

# Spis treści

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Przedmowa</b>  | <b>xi</b> |
| <b>I ■ PRZESTRZEŃ I CZAS W FIZYCE<br/>NEWTONOWSKIEJ ORAZ SZCZEGÓLNEJ TEORII<br/>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<br/>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<br>newtonowskiej  | 47        |
| <b>4 ■ Zasady szczególnej teorii względności</b>  | <b>52</b> |
| 4.1 Dodawanie prędkości i eksperyment<br>Michelsona–Morleya                                     | 52        |
| 4.2 Rozwiązanie problemu podane przez Einsteina<br>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<br/>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–Szekeres’a   | 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        |
| <br>   |            |
| <b>III ■ RÓWNANIE EINSTEINA</b>  | <b>467</b> |
| <br>   |            |
| <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        |
| <br>   |            |
| <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        |
| <br>   |            |
| <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        |
| <br>   |            |
| <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        |
| <br>   |            |
| <b>A ■ Jednostki</b>                                       | <b>604</b> |
| A.1 Problem jednostek                                      | 604        |
| A.2 Jednostki używane w tej książce                        | 605        |
| <br>   |            |
| <b>B ■ Wielkości opisujące krzywiznę</b>                   | <b>608</b> |
| <br>   |            |
| <b>C ■ Krzywizna i równanie Einsteina</b>                  | <b>613</b> |
| <br>   |            |
| <b>D ■ Strategia dydaktyczna</b>                           | <b>618</b> |
| D.1 Zasady dydaktyczne                                     | 618        |
| D.2 Organizacja  | 620        |
| D.3 Planowanie wykładu                                     | 622        |
| <br>   |            |
| <b>Załączniki</b>  | <b>624</b> |
| <br>   |            |
| <b>Bibliografia</b>  | <b>629</b> |
| <br>   |            |
| <b>Źródła ilustracji</b>                                   | <b>635</b> |
| <br>   |            |
| <b>Indeks</b>  | <b>637</b> |