

# 目次

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| まえがき                              | i         |
| <b>第1章 ニュートン力学から特殊相対論へ</b>        | <b>1</b>  |
| 1.1 ニュートン力学とガリレイの相対性原理            | 1         |
| 1.2 マクスウェル方程式とガリレイ変換              | 3         |
| 1.3 ローレンツ変換                       | 5         |
| 1.4 エーテル仮説と光速不変の原理                | 6         |
| 1.4.1 光速の測定実験                     | 7         |
| 1.4.2 エーテルは実在するか? マイケルソン-モーリーの実験  | 8         |
| 1.5 ミンコフスキー時空                     | 10        |
| 1.6 ミンコフスキー時空の性質                  | 13        |
| 1.7 ミンコフスキー時空におけるスカラー, ベクトル, テンソル | 15        |
| 1.8 物理法則の共変形式                     | 16        |
| 1.8.1 相対論的力学                      | 16        |
| 1.8.2 マクスウェル方程式の共変性               | 17        |
| 第1章の問題                            | 19        |
| <b>第2章 一般相対性原理とその数学的表現</b>        | <b>24</b> |
| 2.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?     | 24        |
| 2.2 一般相対論の概念構成                    | 26        |
| 2.3 物理量はテンソルである: 物理学の幾何学化         | 27        |
| 2.3.1 一般座標変換                      | 27        |
| 2.3.2 基底ベクトル                      | 29        |

|   |    |                                  |     |
|---|----|----------------------------------|-----|
| 2.3.3 双対ベクトル基底  | 32 | 第 5 章 シュワルツシルド時空                 | 84  |
| 2.3.4 テンソル (の成分) の変換則のまとめ   | 34 | 5.1 球対称重力場の計量                    | 84  |
| 2.4 平行移動と共変微分   | 35 | 5.2 シュワルツシルド解導出の概略               | 85  |
| 2.5 一般のテンソルの (共変) 微分  | 38 | 5.3 シュワルツシルドブラックホール              | 86  |
| 2.6 リーマン接続とクリストッフェル記号   | 39 | 5.3.1 等方座標系                      | 87  |
| 2.7 平行移動とリーマンの曲率テンソル  | 40 | 5.3.2 動径方向に進む光                   | 88  |
| 2.8 まとめ: 物理量とテンソル   | 43 | 5.4 一般相対論の検証                     | 90  |
| 第 2 章の問題  | 44 | 5.4.1 重力赤方偏移                     | 90  |
| 第 3 章 測地線方程式  | 48 | 5.4.2 近日点移動: 束縛軌道                | 91  |
| 3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式  | 48 | 5.4.3 光線の湾曲: 非束縛軌道               | 94  |
| 3.2 ニュートン理論との対応   | 51 | 5.5 シュワルツシルドブラックホールのまわりの質点の運動    | 98  |
| 3.3 <sup>(#)</sup> 接続係数とゲージ相互作用: $\Gamma^\mu_{\alpha\beta}$ と $A^\mu$ | 52 | 5.5.1 動径方向の運動                    | 98  |
| 第 3 章の問題  | 56 | 5.5.2 角運動量を持つ場合                  | 100 |
| 第 4 章 重力場の方程式   | 59 | 5.6 ブラックホールは観測できるか? エディントン光度     | 102 |
| 4.1 マッハの原理  | 59 | 第 5 章の問題                         | 104 |
| 4.2 エネルギー運動量テンソル  | 60 | 第 6 章 相対論的宇宙モデル                  | 110 |
| 4.3 アインシュタイン方程式への道  | 63 | 6.1 宇宙原理と宇宙の一樣等方性                | 110 |
| 4.4 ニュートン理論との対応   | 66 | 6.2 ロバートソン-ウォーカー計量の幾何学的性質        | 112 |
| 4.5 宇宙定数  | 67 | 6.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ      | 114 |
| 4.6 変分原理による定式化  | 70 | 6.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数                | 117 |
| 4.6.1 重力場: アインシュタイン-ヒルベルト作用   | 71 | 6.5 アインシュタイン-ドジッター宇宙モデル          | 119 |
| 4.6.2 物質場: エネルギー運動量テンソル   | 74 | 6.6 フリードマン宇宙モデル                  | 121 |
| 4.7 <sup>(#)</sup> 時空の対称性と保存則   | 75 | 6.6.1 フリードマン-ルメートル方程式            | 121 |
| 4.7.1 無限小座標変換とキリング方程式   | 75 | 6.6.2 宇宙論パラメータ                   | 123 |
| 4.7.2 時空の対称性とリー微分   | 76 | 6.6.3 宇宙の膨張則と宇宙の未来               | 127 |
| 4.7.3 座標変換に対する不変性: エネルギー運動量保存則  | 78 | 6.7 <sup>(#)</sup> 宇宙定数とダークエネルギー | 130 |
| 4.7.4 ガウスの定理と大局的保存量   | 80 | 6.7.1 アインシュタインの静的宇宙モデル           | 130 |
| 第 4 章の問題  | 81 | 6.7.2 ルメートル宇宙モデル                 | 131 |
|   |    | 6.7.3 実効的な宇宙定数としてのスカラー場          | 132 |
|   |    | 第 6 章の問題                         | 134 |

|                |            |
|----------------|------------|
| <b>章末問題の解答</b> | <b>141</b> |
| 第 1 章 .....    | 141        |
| 第 2 章 .....    | 146        |
| 第 3 章 .....    | 154        |
| 第 4 章 .....    | 158        |
| 第 5 章 .....    | 164        |
| 第 6 章 .....    | 170        |
| <b>参考文献</b>    | <b>182</b> |
| <b>索引</b>      | <b>184</b> |