

# 相対性理論 講義ノート

千葉 剛

注: 相対性理論の講義内容をメモ書きしたノート。力学や電磁気学で扱った内容は前提としている。必要に応じて復習すること。各自内容をよく読み途中にある課題を期日までに解き提出すること。

## Contents

0. はじめに	4
1. 現代物理学と相対性理論	6
2. 特殊相対性原理	12
2-1. ニュートン力学とガリレイ変換	12
2-2. 電磁気学	13
2-3. ガリレイ変換との関係	17
3. 光速度の不変性とローレンツ変換	18
4. 世界間隔	21
4-1. 世界間隔とローレンツ変換	24
4-2. 時間的、光的、空間的關係	26
4-3. 任意の方向へのローレンツ変換	27
5. 同時刻の相対性	29
5-1. 固有長とローレンツ収縮	30
5-2. 固有時間と時計の遅れ	32
5-3. 様々なパラドキシカルな例	34
5-4. 速度の合成則	37
5-5. 光行差	39

<b>6. 4元ベクトル・テンソル</b>	41
6-1. 4元ベクトル	41
1. 内積	42
2. テンソル	43
3. 計量テンソル	44
4. ローレンツ変換の関係式	45
6-2. 粒子の4元速度ベクトル	47
6-3. 4元運動量ベクトル	48
6-4. 運動方程式	49
1. 等加速度運動とリンドラー地平線	50
2. 4元加速度ベクトル	52
6-5. 光の4元波数ベクトル	52
1. 光のドップラー効果	53
6-6. 変分原理	56
<b>7. 相対論的運動学</b>	59
7-1. 粒子の崩壊	59
7-2. 粒子の衝突	61
1. 実験室系	61
2. 重心系	61
3. 運動学的に禁止される反応	62
7-3. 高エネルギー宇宙線と GZK カットオフ	63
<b>8. 等価原理</b>	66
8-1. エトベスの実験	67
8-2. 重力場中の光の軌跡	68
8-3. 測地線方程式	70
1. 変分原理	73
8-4. 弱い重力場中の運動（ニュートン極限）	74
8-5. 重力による時計の遅れ	76
8-6. カーナビと相対性理論	78
<b>9. ブラックホール</b>	82

9-1. シュバルツシルト時空	82
9-2. 質点の周りの運動 (ニュートン重力)	83
9-3. 質点の周りの運動 (シュバルツシルト時空)	84
1. 測地線方程式	84
2. 最小安定円軌道	87
3. 突入軌道	89
9-4. 光の伝播: クルスカル拡張	90
1. ブラックホール	93
2. ペンローズ図	93
<b>10. 膨張宇宙</b>	95
10-1. 観測事実	95
10-2. 膨張宇宙のダイナミクス	97
10-3. 宇宙の幾何学と宇宙の未来	99
10-4. 特異点定理	101
<b>11. 曲率</b>	103
11-1. ベクトル場の平行移動	103
11-2. 曲率	105
11-3. 共変微分	108
11-4. 物質場のエネルギー運動量テンソル	111
11-5. アインシュタイン方程式	113
<b>12. シュバルツシルト解</b>	116
12-1. 近星点移動	119
12-2. 光の測地線方程式	121
12-3. 光の屈折角	123
12-4. 時間の遅れ	124
12-5. バーコフの定理	127