

相対性理論

中村正明

2023年7月3日

目次

1	光速不変の原理と相対性原理	3
1.1	アインシュタイン以前の物理学の認識	3
1.2	マイケルソン・モーレーの実験	3
1.3	アインシュタインの考え	5
1.4	時間の相対性	5
1.5	長さの相対性	6
1.6	具体例	8
2	ローレンツ変換	9
2.1	ローレンツ変換	9
2.2	ミンコフスキーの時空	11
2.3	不変量	13
2.4	固有時間と線素	14
2.5	速度の合成則	15
3	ドップラー効果	17
3.1	波の位相	17
3.2	音のドップラー効果	17
3.3	光のドップラー効果	18
3.4	ブラッドレーの光行差	20
4	加速度運動	21
4.1	一様な加速度の運動	21
4.2	双子の問題	23
4.3	速度と垂直方向の加速度	24
5	特殊相対論的力学	25
5.1	相対論的運動方程式	25
5.2	質量とエネルギーの等価性	26
5.3	相対論的力学における解析力学	28
6	4元形式	29
6.1	ローレンツ変換	29
6.2	4元ベクトル	30
6.3	4元速度と4元運動量	31
6.4	4元運動方程式	32
6.5	4元電流	33
6.6	保存則	33
6.7	エネルギー運動量テンソル	34
7	ベクトルとテンソル	35
7.1	ベクトルの変換	35
7.2	反変ベクトルと共変ベクトル	37
7.3	テンソルの変換	39
7.4	計量	40
8	電磁場の相対性とテンソル表現	41
8.1	電磁場のローレンツ変換	41
8.2	マクスウェル方程式の書き換え	44
8.3	テンソルによる電磁場のローレンツ変換	49
8.4	4元電流に対するローレンツ変換と連続の式	49
8.5	荷電粒子に対する4元運動方程式	50
9	等価原理と運動方程式	51
9.1	一般相対性理論の出発点	51
9.2	運動方程式	52
9.3	測地線と自由運動	55

10 曲率テンソルと共変微分	59
10.1 曲がった空間と曲率テンソル	59
10.2 共変微分と平行移動	63
11 重力場の方程式	69
11.1 アインシュタインのテンソル	69
11.2 エネルギー運動量テンソル	73
11.3 重力場の方程式	76
12 シュヴァルツシルトの時空	77
12.1 外部解	77
12.2 内部解	80
12.3 ニュートン近似	83
12.4 星の内部の圧力	83
13 水星の近日点の移動	85
13.1 ニュートン力学	85
13.2 特殊相対性理論	86
13.3 一般相対性理論	87
14 重力場における光の湾曲	89
14.1 ニュートン力学	89
14.2 一般相対性理論	90
15 重力赤方偏移	92
15.1 光の粒子説による説明	92
15.2 一般相対性理論による説明	92
15.3 2つの説明のつながり	94
16 宇宙論	95
16.1 球面上の線素	95
16.2 閉じた空間と開いた空間	98
16.3 アインシュタインの静的宇宙	100
16.4 フリードマンの膨張宇宙モデル	100
16.5 ハッブルの法則	107
17 重力波	109
A 解析力学	1
B シュヴァルツシルト解の計算	2
C 変分原理による重力場の方程式の導出	5