

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>9</b>
1.1	Unités et électrodynamique . . . . .	11
1.1.1	Le système de Lorentz-Heaviside . . . . .	12
1.1.2	Le système gaussien . . . . .	12
1.1.3	Le système électrostatique . . . . .	13
1.1.4	Le système électromagnétique . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Principe de relativité</b>	<b>15</b>
2.1	Relativité galiléenne . . . . .	15
2.1.1	Exercices . . . . .	17
2.2	Relativité restreinte . . . . .	18
2.2.1	Principe de relativité et transformations de Lorentz . . . . .	18
2.2.2	Transformations infinitésimales . . . . .	20
2.2.3	Transformations finies . . . . .	21
2.2.4	Simultanéité . . . . .	22
2.2.5	Dilatation des temps . . . . .	22
2.2.6	Contraction des longueurs . . . . .	23
2.2.7	Intervalle d'espace-temps et causalité . . . . .	23
2.3	Groupe de Lorentz . . . . .	24
2.3.1	Transformations spéciales de Lorentz . . . . .	25
2.3.2	Transformation générale de Lorentz . . . . .	26
2.4	Exercices . . . . .	29
2.4.1	Électromagnétisme et relativité galiléenne . . . . .	29
2.4.2	Covariance de l'équation de Schrödinger . . . . .	32
2.4.3	Désintégration de muons cosmiques . . . . .	34
2.4.4	Contraction des longueurs . . . . .	34
2.4.5	La voiture et le garage . . . . .	35
2.4.6	Contraction d'une règle inclinée . . . . .	35
2.4.7	Transformation des vitesses . . . . .	36
2.4.8	Composition des transformations de Lorentz . . . . .	37

2.4.9	Groupe de Lorentz . . . . .	39
2.4.10	Transformations conformes . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Tenseurs et champs de tenseurs</b>	<b>45</b>
3.1	4-vecteurs . . . . .	45
3.2	Tenseurs . . . . .	47
3.2.1	Opérations sur les tenseurs . . . . .	49
3.2.2	Tenseurs invariants . . . . .	51
3.3	Champs de tenseurs . . . . .	53
3.4	Équations manifestement covariantes . . . . .	54
3.5	Exercices . . . . .	56
3.5.1	Effet Doppler . . . . .	56
3.5.2	Manipulations de tenseurs . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Dynamique relativiste d'une particule classique</b>	<b>59</b>
4.1	Équations du mouvement . . . . .	59
4.2	Principe de moindre action . . . . .	62
4.2.1	Le cas non-relativiste . . . . .	62
4.2.2	Action relativiste d'une particule libre . . . . .	64
4.2.3	Interaction avec un champ extérieur scalaire . . . . .	65
4.2.4	Interaction vectorielle . . . . .	66
4.3	Exercices . . . . .	68
4.3.1	Désintégration d'une particule . . . . .	68
4.3.2	Réactions et lois de conservation . . . . .	69
4.3.3	Généralisation de la force non-relativiste constante . . . . .	72
4.3.4	Particule dans un champ scalaire . . . . .	74
4.3.5	Mouvement dans un champ vectoriel coulombien . . . . .	76
4.3.6	Mouvement dans un champ scalaire coulombien . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Le champ électromagnétique</b>	<b>85</b>
5.1	Les équations de Maxwell . . . . .	85
5.1.1	Courant d'une particule ponctuelle . . . . .	89
5.2	Transformation du champ électromagnétique . . . . .	89
5.2.1	Invariants quadratiques . . . . .	90
5.3	Action de Maxwell . . . . .	91
5.4	Tenseur énergie-impulsion . . . . .	93
5.4.1	Exemple d'une particule libre . . . . .	94
5.4.2	Tenseur énergie-impulsion du champ électromagnétique . . . . .	95
5.4.3	Énergie du champ coulombien . . . . .	96
5.4.4	Transformation de l'énergie et de l'impulsion électromagnétique . . . . .	97

5.4.5	Ondes planes dans le vide . . . . .	100
5.5	Exercices . . . . .	102
5.5.1	Mouvement dans un champ constant et uniforme . . . . .	102
5.5.2	Forme manifestement covariante du champ d'une particule en mouvement uniforme . . . . .	104
5.5.3	Moment angulaire . . . . .	105
5.5.4	Tenseur énergie-impulsion et lagrangien . . . . .	107
<b>6</b>	<b>Solutions des équations de Maxwell dans le vide</b>	<b>109</b>
6.1	Équation d'onde . . . . .	109
6.2	Équations de Maxwell dans le vide . . . . .	112
6.2.1	Jauge de Coulomb . . . . .	112
6.2.2	Solution pour les champs électriques et magnétiques . . . . .	113
6.3	Exercices . . . . .	113
6.3.1	Photon massif . . . . .	113
6.3.2	Le propagateur $\Delta$ . . . . .	115
6.3.3	Équations de Maxwell sous la forme de Schrödinger . . . . .	117
<b>7</b>	<b>Potentiels et champs retardés</b>	<b>119</b>
7.1	Fonctions de Green . . . . .	119
7.2	Solutions des équations d'onde avec sources . . . . .	121
7.3	Potentiel de Liénard-Wiechert . . . . .	122
7.4	Champ d'une particule ponctuelle . . . . .	123
7.4.1	Transversalité . . . . .	125
7.4.2	Le champ coulombien . . . . .	125
7.4.3	Le champ de rayonnement . . . . .	126
7.4.4	Limite non-relativiste . . . . .	127
7.4.5	Flux d'énergie . . . . .	127
7.5	Force de réaction . . . . .	128
7.6	Exercices . . . . .	130
7.6.1	Limite semi-relativiste des potentiels retardés . . . . .	130
7.6.2	Instabilité classique de l'atome d'hydrogène . . . . .	131
7.6.3	Force de réaction . . . . .	133
7.6.4	Distribution angulaire de la puissance rayonnée . . . . .	135
7.6.5	Puissance totale relativiste rayonnée par une particule . . . . .	138
7.6.6	Potentiel retardé massif . . . . .	140
<b>8</b>	<b>Rayonnement et développement multipolaire</b>	<b>145</b>
8.1	Source oscillatoire et localisée . . . . .	145
8.1.1	Les zones proches et de rayonnement . . . . .	147
8.2	Développement multipolaire . . . . .	148

8.2.1	Zone proche . . . . .	148
8.2.2	Zone de rayonnement . . . . .	151
8.3	Exercices . . . . .	152
8.3.1	Puissance totale rayonnée par une source localisée . . . . .	152
8.3.2	Antenne linéaire . . . . .	154
<b>9</b>	<b>Problèmes corrigés</b>	<b>155</b>
9.1	Problème I : Problème à deux corps électromagnétique . . . . .	155
9.1.1	Champ créé par une particule . . . . .	156
9.1.2	Équation du mouvement . . . . .	157
9.1.3	Deux particules en interaction . . . . .	157
9.2	Problème II : Électromagnétisme non-linéaire . . . . .	163
9.2.1	Équations du mouvement . . . . .	164
9.2.2	Tenseur énergie-impulsion . . . . .	165
9.2.3	Champ coulombien et énergie propre . . . . .	165
9.3	Problème III : Énergie et impulsion d'une sphère chargée . . . . .	173
9.4	Problème IV : Facteur de forme relativiste . . . . .	177
9.4.1	Équations du mouvement . . . . .	177
9.4.2	Facteur de forme . . . . .	178
9.4.3	Cas statique . . . . .	178
9.4.4	Interaction de la particule avec elle-même . . . . .	179
<b>10</b>	<b>Introduction à l'Électrodynamique quantique</b>	<b>193</b>
10.1	Quantification . . . . .	193
10.2	Oscillateur harmonique . . . . .	194
10.3	Le champ électromagnétique comme un ensemble d'oscillateurs	194
10.3.1	Action . . . . .	195
10.4	Champ électromagnétique quantique . . . . .	197
10.5	Exercices . . . . .	199
10.5.1	Fluctuations du champ électrique dans le vide . . . . .	199
10.5.2	Émission spontanée et induite . . . . .	200
	<b>Annexes</b>	<b>205</b>
	<b>A Quelques repères historiques</b>	<b>205</b>
	<b>B Les équations de Maxwell et les formes différentielles</b>	<b>209</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>211</b>