

COLLECTION



R. LENNUIER

P.-Y. GAL

D. PERRIN

**MECANIQUE DES
PARTICULES
CHAMPS**

PREMIER CYCLE DE L'EN-
SEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ARMAND COLIN

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	5
Chapitre 1. La description du mouvement d'une particule	7
1.1 Le cadre spatio-temporel	7
1.2 Rappel de quelques définitions cinématiques : vitesse et accélération	9
1.3 Changement de repère en cinématique classique	12
1.3.1 Transformation de la vitesse	13
1.3.2 Transformation de l'accélération	15
1.4 Exercices	16
Chapitre 2. Dynamique des particules : les principes	22
2.1 Définition et mesure de la masse	23
2.2 Quantité de mouvement	23
2.3 Formulation du principe d'inertie	24
2.4 Principe de la conservation de la quantité de mouvement d'un système de particules ne subissant aucune action extérieure (système « isolé »)	26
2.5 Echange de quantité de mouvement entre deux particules	26
2.6 Définition dynamique de la masse	28
2.7 Notion de force	29
2.7.1 Définition générale de la force	29
2.7.2 Forces intérieures et forces extérieures d'un système de particules	30
2.7.3 Principe de la conservation de la masse	30
2.7.4 Loi de la dynamique de Newton	30
2.8 Définition de la force et changement de référentiel	32
2.9 Exercices	34
Chapitre 3. Théorèmes généraux de la dynamique des particules	41
3.1 Théorème du moment cinétique	41
3.1.1 Le moment cinétique par rapport à un point	41
3.1.2 Théorème du moment cinétique	42
3.2 Une application importante : mouvement à force centrale	42
3.3 Moment cinétique d'un système de particules	44
3.4 Travail. Puissance	46
3.4.1 Définition générale de la puissance	46
3.4.2 Définition générale du travail	46
3.4.3 Relation entre travail et puissance	47

3.5	Théorème de l'énergie cinétique	48
3.6	Energie potentielle d'un système isolé de deux particules	49
3.7	Exemples d'interaction entre deux particules	51
3.8	Exercices	54
Chapitre 4. Etude du mouvement de deux particules non soumises à une action extérieure.		
	Collisions	62
4.1	Le référentiel du centre des masses	62
4.2	Energie cinétique et référentiel du centre des masses	63
4.3	Mouvement de deux particules formant un système isolé, dans le référentiel du centre des masses	64
4.4	Interaction ne dépendant que de la distance	66
4.5	Etude du mouvement de la particule fictive en coordonnées polaires	67
4.5.1	Le mouvement étant plan peut se décrire en coordonnées polaires	67
4.5.2	Etats liés et état non liés des particules A et B	69
4.6	Les collisions	70
4.6.1	Collisions élastiques de deux particules	70
4.6.2	Collisions traitées dans un référentiel différent de R_0	75
4.6.3	Collisions inélastiques. Généralisation	77
4.7	Exercices	79
Chapitre 5. L'agitation moléculaire dans les gaz		88
5.1	Introduction	88
5.2	Existence d'une loi de distribution des vitesses	90
5.3	Energie cinétique. Vitesse quadratique moyenne	92
5.4	Pression exercée sur les parois par un gaz en équilibre dans une enceinte	93
5.5	Comparaison avec les lois expérimentales des gaz. Température cinétique	97
5.5.1	Choix de l'échelle des températures cinétiques	97
5.5.2	Signification physique de la température cinétique pour un corps quelconque en état d'équilibre	99
5.5.3	Agitation moléculaire et chaleur	100
5.5.4	Données numériques relatives aux vitesses quadratiques moyennes des molécules d'un gaz	101
5.6	La loi de répartition des vitesses	102
5.7	Exercices	103
Chapitre 6. Champs de grandeurs physiques dans l'espace euclidien		109
6.1	Introduction	109
6.2	Champ d'une grandeur scalaire	111
6.2.1	Dérivées partielles et fonction différentiable	111
6.2.2	Surface équipotentielle	112
6.2.3	Gradient du champ H	112
6.3	Champ de vecteurs	114
6.3.1	Circulation du vecteur $\vec{A}(M)$	114
6.3.2	Champ vectoriel dérivant d'un potentiel	115
6.3.3	Flux d'un champ vectoriel à travers une surface	117
6.3.4	Formule d'Ostrogradski (théorème de Green)	118

6.3.5	Formule de Stokes	122
6.3.6	Champs irrotationnels. Champs conservatifs	123
6.4	Coordonnées cylindriques. Coordonnées sphériques	124
6.4.1	Système de coordonnées cylindriques	124
6.4.2	Système de coordonnées sphériques	125
6.5	Propriétés de quelques champs remarquables	127
6.5.1	Champ vectoriel défini comme superposition linéaire de plusieurs champs	127
6.5.2	Champ vectoriel uniforme	128
6.5.3	Champ vectoriel central	128
6.5.4	Champs irrotationnels centraux à divergence partout nulle sauf à l'origine (ou champs coulombiens)	130
6.6	Application : particule soumise à un champ de forces dérivant d'un potentiel, énergie potentielle	134
6.7	Exercices	135
Chapitre 7. Le champ électrique coulombien		149
7.1	Champ électrostatique. Charges électriques	149
7.1.1	Définition du champ électrostatique	150
7.1.2	Principe de superposition des champs	151
7.1.3	La charge électrique d'une particule	152
7.2	Le potentiel électrostatique	156
7.3	Potentiel électrostatique créé par quelques répartitions simples de charges ponctuelles	157
7.3.1	Potentiel créé par une charge unique	157
7.3.2	Potentiel créé par deux charges égales	159
7.3.3	Potentiel créé par deux charges opposées	159
7.3.4	Potentiel créé par un ensemble de charges ponctuelles à une distance grande devant les dimensions de cet ensemble	162
7.4	Les répartitions continues de charges	165
7.4.1	Densité volumique de charge	165
7.4.2	Potentiel électrostatique créé par une répartition continue de charges ..	166
7.4.3	Champ électrostatique en M	167
7.5	Le théorème de Gauss en électrostatique	168
7.5.1	Le théorème de Gauss et le rayon des particules chargées élémentaires ..	169
7.5.2	Définition du vecteur \vec{D} , induction électrique	170
7.6	Quelques exemples de calcul du potentiel créé par des répartitions continues ..	172
7.6.1	Charge Q_0 répartie uniformément dans une sphère de rayon R_0 et de centre O	172
7.6.2	Couche uniforme entre deux plans parallèles	174
7.6.3	Superposition de répartitions de charges	176
7.7	L'énergie électrostatique	176
7.7.1	Energie potentielle d'une charge dans un champ électrique donné	177
7.7.2	Energie électrostatique d'un système de charges	178
7.7.3	Forces intérieures d'un système électrostatique	182
7.7.4	Calcul des forces électrostatiques subies par les charges d'un système de charges ponctuelles à partir de l'énergie électrostatique	183

7.8	Dipôle électrique dans un champ électrostatique	184
7.8.1	Calcul de l'énergie mutuelle du dipôle et du système des charges extérieures	185
7.8.2	Efforts subis par un dipôle dans un champ électrique.....	187
7.9	Exercices	191
Chapitre 8.	Le champ de gravitation	201
8.1	L'interaction de gravitation	201
8.2	Champ et potentiel de gravitation	202
8.3	Masse gravitationnelle et masse d'inertie	205
8.4	Définition d'une nouvelle famille R_K de référentiels	208
8.5	Mesure de la constante de gravitation \mathcal{G}	212
8.6	Mouvement d'un corps dans le champ de gravitation de la terre	213
8.6.1	Soit M la position occupée à un instant donné par un corps de petites dimensions	213
8.6.2	Données numériques relatives à la pesanteur	216
8.6.3	Mouvement autour de la Terre. Satellisation. Libération	216
8.7	Energie de gravitation	220
8.8	Exercices	221
Chapitre 9.	Relativité restreinte : cinématique.....	228
9.1	Contradictions rencontrées par la cinématique et la dynamique classiques ...	228
9.2	Recherche d'un critère expérimental : l'expérience de Michelson et Morley ...	231
9.3	Le cadre spatio-temporel en cinématique relativiste. Référentiels galiléens ...	232
9.4	Changement de repère galiléen. Transformation de Lorentz	234
9.5	Simultanéité ou ordre chronologique de deux événements	237
9.6	Observation dans R_2 de la distance de deux points fixes de R_1 et de la marche d'une horloge fixe dans R_1	240
9.7	Transformation des vitesses	243
9.8	Exercices	245
Chapitre 10.	Relativité restreinte : dynamique des particules	255
10.1	Energie d'un système.....	255
10.2	Expression de l'énergie cinétique d'une particule	256
10.3	Energie totale d'une particule de vitesse inférieure à c . Equivalence entre masse et énergie	260
10.4	Quantité de mouvement d'une particule de vitesse inférieure à c	262
10.5	Quadrivecteur impulsion-énergie d'une particule de vitesse inférieure à c	264
10.6	Impulsion-énergie d'un photon	265
10.7	Collisions	266
10.8	Force. Théorème de l'énergie cinétique	267
10.9	Exercices	269
Annexe 3.A.	Oscillateur harmonique	283
Annexe 4.A.	Le mouvement des noyaux dans une molécule diatomique.....	286
4.A.1	Equations du mouvement	286
4.A.2	Mouvement d'oscillation	287

4.A.3	Mouvement de rotation	291
4.A.4	Oscillation et rotation	294
Annexe 4.B.	Collision de deux sphères dures : construction des trajectoires	296
Annexe 5.A.	La loi de distribution des modules des vitesses (loi de Maxwell)	299
Annexe 5.B.	Une propriété de la loi de répartition des vitesses	301
Annexe 5.C.	Description d'une expérience de jet atomique	303
Annexe 6.A.	Circulation d'un champ de vecteurs le long d'un contour fermé	306
Annexe 6.B.	Tableau des opérateurs gradient, rotationnel, divergence	309
Annexe 6.C.	Sur l'énergie potentielle	311
Annexe 7.A.	Déviations des particules α par les noyaux lourds	314
7.A.1	Le problème théorique	314
7.A.2	Etude expérimentale	318
7.A.3	Interprétation des résultats	320
Annexe 7.B.	Circulation des forces électrostatiques mutuelles d'un système de charges ponctuelles	322
Annexe 7.C.	Energie électrostatique d'un système comportant des charges ponctuelles et des répartitions continues	324
Annexe 8.A.	Trajectoires d'une particule soumise à une force centrale attractive en $1/r^2$..	326
8.A.1	Equation d'une conique en coordonnées polaires	326
8.A.2	Equation différentielle des trajectoires dans un champ de forces central à symétrie sphérique	326
8.A.3	Trajectoires dans le cas d'une attraction en $1/r^2$	329
Annexe 8.B.	Mouvement du centre des masses d'un système	333
8.B.1	Application au mouvement d'un système matériel dans un champ de gravitation	334
Annexe 9.A.	Expérience de Michelson et Morley	335
Annexe 9.B.	Transformation de Lorentz : aperçu de sa construction	340
9.B.1	Transformation spéciale de Lorentz	340
9.B.2	Transformation générale de Lorentz	345
Annexe 9.C.	Interprétation géométrique de la transformation spéciale de Lorentz	347
9.C.1	La transformation spéciale de Lorentz comme changement de repère dans un espace affine	347
9.C.2	Représentation graphique pour les événements ayant lieu sur l'axe $O_1 x_1$	348
9.C.3	Illustration graphique du § 9.6	350
Annexe 10.A.	Transformation du champ électromagnétique dans un changement de référentiel galiléen	352
10.A.1	Transformation d'une force	353
10.A.2	Transformation d'un champ électromagnétique	354
10.A.3	Illustration	356