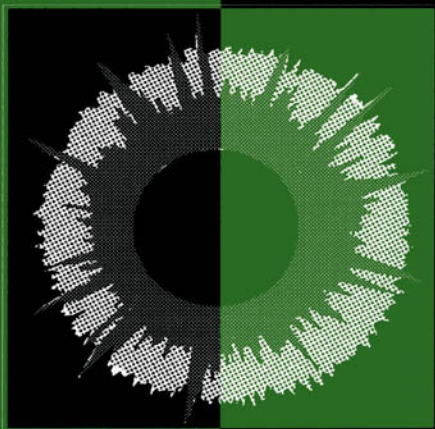


PHYSIQUE

Jean-Loup DELCROIX - Abraham BERS

Physique des plasmas

• 2 •



SAVOIRS ACTUELS

 CNRS EDITIONS


EDP
SCIENCES

Physique des plasmas

2

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Jean-Loup Delcroix
Université Paris-Sud, Orsay
École Supérieure d'Électricité, Gif-sur-Yvette

Abraham Bers
Department of Electrical Engineering
and Computer Science (M.I.T.), Cambridge, États-Unis
Plasma Fusion Center (M.I.T.), Cambridge, États-Unis
Research Laboratory of Electronics (M.I.T.), Cambridge, États-Unis

Physique des plasmas

2

S A V O I R S A C T U E L S

InterÉditions / CNRS Éditions

Dessin de couverture : représentation de la couronne solaire

© 1994, **InterEditions**, 7, rue de l'Estrapade, 75005 Paris
et
CNRS Editions, 20/22, rue Saint-Amand, 75015 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle).

Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. 43.26.95.35.

ISBN 2-7296-0500-2

ISBN 2-271-05127-4

Table des matières

Avant-propos	XXI
Notations	XXV
8 Équations cinétiques	1
8.1 Introduction	1
8.2 Équation de Liouville d'un gaz pur	3
8.2.1 Densité dans l'espace des phases	3
8.2.2 Équation de Liouville pour des variables conjuguées	5
8.2.3 Système sans interactions dépendant de la vitesse	6
8.2.4 Application aux plasmas	7
8.3 Système d'équations de BBGKY	9
8.3.1 Fonction de distribution et densité simples	9
8.3.2 Fonction de distribution et densité doubles	10
8.3.3 Fonctions de distribution et densités multiples	12
8.3.4 Système d'équations de BBGKY	12
8.4 Équations cinétiques d'un gaz pur	15
8.4.1 Équation de Liouville à une particule	15
8.4.2 Équation de Vlasov	16
8.4.3 Équation de Boltzmann	17
8.4.4 Propriétés de l'équation de Boltzmann	23
8.5 Équations cinétiques des mélanges	27
8.5.1 Fonctions de distribution	27
8.5.2 Équations cinétiques	28
8.6 Théorie des gaz réactifs (effets des collisions inélastiques)	29
8.6.1 Introduction des collisions inélastiques	29
8.6.2 Collisions du type 12/34. Équation de Boltzmann	29
8.6.3 Collisions 12/14 et 12/114 avec $m_1 \ll m_2, m_4$	31
8.7 Appendices	32
A8-1 Particules chargées dans un champ électro-magnétique	32

A8-2	Équation d'évolution de f_1	34
A8-3	Régime de fluide. Régime moléculaire	36
A8-4	Notions sur la théorie cinétique des gaz réactifs	37
8.8	Problèmes	40
P8-1	Structure des corrélations à l'équilibre thermodynamique	40
P8-2	Corrélations dans un plasma à l'équilibre thermodynamique	41
P8-3	Invariants intégraux de l'équation de Boltzmann	42
P8-4	Solution générale maxwellienne déplacée	42
9	Hydrodynamique et magnétohydrodynamique	43
9.1	Introduction	43
9.2	Équations hydrodynamiques d'un gaz pur	44
9.2.1	Définitions des grandeurs hydrodynamiques	44
9.2.2	Équation de transport d'une grandeur $A(\vec{r}, \vec{w}, t)$	47
9.2.3	Propriétés des termes d'interaction $C(A)$	49
9.2.4	Les trois équations fondamentales de conservation	50
9.2.5	Équation de transport des moments d'ordre 2	53
9.2.6	Fermeture du système des équations hydrodynamiques	54
9.3	Hydrodynamique des mélanges gazeux et des plasmas	57
9.3.1	Variables partielles et variables globales	57
9.3.2	Propriétés des termes d'interaction	59
9.3.3	Conservation de la masse et de l'électricité	60
9.3.4	Conservation de la quantité de mouvement globale	61
9.3.5	Loi d'Ohm généralisée	62
9.4	Notions de magnétohydrodynamique	65
9.4.1	Liquides conducteurs	66
9.4.2	Gaz faiblement ionisés	73
9.4.3	Gaz totalement ionisés	75
9.5	Confinement et diamagnétisme	77
9.5.1	Confinement magnétique d'un plasma	77
9.5.2	Diamagnétisme d'un plasma	79
9.5.3	Vitesses macroscopiques et vitesses de dérives des particules	80
9.6	Effets des collisions inélastiques	83
9.7	Appendices	84
A9-1	Termes d'interaction dans les équations de transport	84
A9-2	Équations de transport des moments d'ordre 2	92
A9-3	Compressions adiabatiques sans collisions	93
A9-4	Loi d'Ohm dans les plasmas complexes	97
9.8	Problèmes	100

P9-1	Équation d'évolution de U_P	100
P9-2	Décomposition de f_{12} en trois termes	100
P9-3	Hydrodynamique des corrélations	100
P9-4	Loi d'Ohm pour un plasma binaire	101
P9-5	Courant de déplacement négligeable	101
10	Théorie cinétique de Vlasov-Landau	103
10.1	Introduction	103
10.2	Modèle de Vlasov-Maxwell	107
10.2.1	Réversibilité par rapport au temps	108
10.2.2	Incompressibilité dans l'espace des phases	108
10.2.3	Conservation de l'entropie	118
10.2.4	Conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement	120
10.3	Dynamique électrostatique, linéarisée, à une dimension	122
10.3.1	Solution des équations linéarisées par transformation de Fourier-Laplace	123
10.3.2	Perturbations périodiques dans l'espace	131
10.3.3	Excitation externe d'un plasma stable	139
10.3.4	Modes naturels faiblement croissants ou décroissants	145
10.3.5	Énergie d'onde et puissance dissipée dans l'effet Landau	148
10.3.6	Ondes électrostatiques dans un plasma maxwellien	155
10.4	Plasmas non magnétisés sans champ	164
10.4.1	Formules générales	164
10.4.2	Distributions d'équilibre isotropes	166
10.5	Modes de van Kampen et Case	175
10.6	Effets collisionnels	180
10.6.1	Collisions dans la dynamique linéarisée	180
10.6.2	Modèle simple de relaxation par collisions	181
10.6.3	Modèle BGK de collisions	182
10.6.4	Modèles de collisions du type Fokker-Planck	183
10.7	Effets non linéaires	188
10.7.1	Piégeage des particules	189
10.7.2	Paquets d'ondes et diffusion quasi linéaire	195
10.7.3	Couplages non linéaires onde-onde et onde-particules. Ondes non linéaires	206
10.7.4	Échos d'ondes de plasma	216
10.8	Appendice	218
A10-1	Fonction de dispersion des plasmas	218
10.9	Problèmes	222
P10-1	Écoulement libre et équations hydrodynamiques	222

P10-2	Écoulement libre avec des perturbations initiales générales	223
P10-3	Distribution d'équilibre dans un plasma inhomogène	223
P10-4	Conservation non relativiste de l'énergie et de la quantité de mouvement	224
P10-5	Solution par la méthode des caractéristiques	224
P10-6	Plasma de Lorentz-Cauchy : susceptibilité	224
P10-7	Plasma de Lorentz-Cauchy : réponse aux conditions initiales	225
P10-8	Instabilité faisceau d'électrons-plasma : solutions ap- prochées	225
P10-9	Flux d'énergie moyen pour les ondes	225
P10-10	Développement asymptotique de la susceptibilité pour $v_p \gg v_{Te}$	226
P10-11	Champs dans les ondes longitudinales faiblement amorties	226
P10-12	Coupage relativiste de l'amortissement de Landau .	226
P10-13	Propriétés des racines de la relation de dispersion des ondes de plasma électroniques	227
P10-14	Tenseur de susceptibilité pour un plasma isotrope, non magnétisé	227
P10-15	Épaisseur de peau collisionnelle	228
P10-16	Analogie du champ électrique pour la résolution de la relation de dispersion de Vlasov	228
P10-17	Orthogonalité des fonctions propres de Case	228
P10-18	Modèle BGK de collisions : relation de dispersion . .	229
P10-19	Relaxation dans le modèle de collisions de Lenard- Bernstein	229
P10-20	Diffusion quasi linéaire dans l'approximation des phases aléatoires	229
P10-21	Puissance dissipée dans un état stationnaire produit par la diffusion quasi linéaire et les collisions	230
P10-22	Création de courant dans un plasma	230
P10-23	Relations de Manley-Rowe pour les couplages cohérents onde-onde	230
P10-24	Équations des ondes couplées dans l'approximation des phases aléatoires	230
11	Théorie cinétique des instabilités dans les plasmas non magnétisés	231
11.1	Introduction	231
11.2	Conditions de stabilité de Newcomb-Gardner	232

11.2.1	Perturbations quelconques	232
11.2.2	Perturbations électrostatiques	236
11.3	Critères de Penrose (perturbations électrostatiques)	241
11.3.1	Généralités	241
11.3.2	Méthode de Nyquist	242
11.3.3	Critères de Penrose	244
11.3.4	Plasma équivalent à un faisceau	248
11.3.5	Distributions unidimensionnelles à un minimum	251
11.4	Théorie cinétique des instabilités électromagnétiques	272
11.4.1	Discussion générale	272
11.4.2	Distributions anisotropes symétriques perpendiculairement à \vec{k}	274
11.5	Problèmes	283
P11-1	Non-unicité de l'équation de conservation de l'énergie de perturbation	283
P11-2	Équation de conservation au second ordre par rapport aux champs	283
P11-3	Équation de conservation de l'énergie de perturbation moyennée sur l'espace, pour des distributions isotropes	283
P11-4	Conditions nécessaires et suffisantes de Penrose pour l'instabilité électrostatique	284
P11-5	Ondes faiblement amorties sur un faisceau maxwellien d'électrons	284
P11-6	Interaction faisceau d'électrons-plasma : faisceau chaud et plasma froid	284
P11-7	Faisceaux d'électrons opposés maxwelliens	284
P11-8	Conditions d'existence de modes indépendants transverses électromagnétiques et longitudinaux électrostatiques	285
P11-9	Relation de dispersion électrostatique pour des distributions anisotropes	285
P11-10	Modes TEM pour des distributions isotropes perpendiculairement à \vec{k}	285
P11-11	Modes TEM pour des distributions isotropes	285
P11-12	Faisceaux opposés avec anisotropies de températures : relations de dispersion TEM	285
P11-13	Instabilité de Weibel : effet de l'élargissement thermique dans la direction de \vec{B}_1	286

12 Théorie cinétique des gaz faiblement ionisés	287
12.1 Introduction	287
12.2 Gaz de Lorentz électrons-neutres	289
12.2.1 Couplages électrons-ions-neutres	289
12.2.2 Modèle de Lorentz électrons-neutres	290
12.3 Relaxation des anisotropies électroniques	292
12.3.1 Définition des fréquences de relaxation	292
12.3.2 Données théoriques sur les fréquences de relaxation	295
12.3.3 Données expérimentales sur les fréquences de relaxation	296
12.4 Conductivité sans échauffement des électrons	297
12.4.1 Approximation des champs faibles	297
12.4.2 Tenseur de conductivité électronique	299
12.5 Échauffement du gaz d'électrons : effet Joule	302
12.5.1 Expression de la partie isotrope de f	302
12.5.2 Effet Joule	305
12.6 Refroidissement des électrons par collisions élastiques	306
12.6.1 Modèle de Lorentz imparfait	306
12.6.2 Relaxation de la partie isotrope de f	307
12.7 Équilibre effet Joule-refroidissement par collisions	309
12.7.1 Méthode quasi linéaire. Formule de Margenau en HF	309
12.7.2 Formule de Margenau pour les champs continus et BF	311
12.7.3 Discussion de la formule de Margenau	312
12.7.4 Mobilité électronique. Loi de similitude	314
12.8 Diffusion libre des électrons	315
12.8.1 Formules générales	315
12.8.2 Détermination de α_o	318
12.8.3 Flux et coefficients de diffusion	321
12.8.4 Flux d'énergie et conductivité thermique	323
12.9 Plasmas intermédiaires	325
12.9.1 Définition des plasmas "intermédiaires"	325
12.9.2 Théorie cinétique des plasmas intermédiaires	329
12.10 Appendices	330
A12-1 Anisotropies et hydrodynamique	330
A12-2 Développement de l'équation de Boltzmann	335
A12-3 Formule de Chapman et Cowling	339
12.11 Problèmes	340
P12-1 Règle de sélection pour le terme de diffusion	340
P12-2 Terme de diffusion dans l'approximation linéaire	340
P12-3 Règle de sélection pour les termes électriques	340

P12-4	Terme électrique dans l'approximation linéaire . . .	341
P12-5	Terme magnétique	341
P12-6	Effet Joule en présence d'un champ magnétique . . .	341
P12-7	Normalisation de la formule de Margenau	341
P12-8	Champ critique en présence d'un champ magnétique	342
P12-9	Distribution de Druyvesteyn	342
P12-10	Fréquences de collisions moyennes pour la mobilité et la diffusion	342
P12-11	Plasmas intermédiaires : mobilité et température électroniques	343
P12-12	Diffusion dans les plasmas intermédiaires	343
13	Théorie cinétique collisionnelle des plasmas	345
13.1	Introduction	345
13.2	Étude préliminaire des collisions électron-ion	347
13.2.1	Relaxation électrons-ions. Coupure de Debye	347
13.2.2	Coupure à la longueur de Debye	348
13.3	Coefficients de transport dans l'espace des vitesses	352
13.3.1	Définitions générales	352
13.3.2	Collisions $e-i$. Relations avec les fréquences de relaxation	355
13.3.3	Collisions $a-b$. Distribution maxwellienne dans la cible	357
13.3.4	Coefficients de ralentissement dans un plasma	359
13.3.5	Coefficients de dispersion angulaire dans un plasma.	361
13.4	Les temps de relaxation dans un plasma	363
13.4.1	Définitions	363
13.4.2	Temps de relaxation moyens dans un plasma	364
13.4.3	Relation entre les deux fréquences fondamentales ω_p et ν_1	366
13.5	Équation de Fokker-Planck	367
13.6	Équations cinétiques des plasmas	370
13.6.1	Forme générale pour les collisions lointaines	371
13.6.2	Passage de l'équation de Liouville aux équations cinétiques	372
13.7	Conductivité électrique	378
13.7.1	Conductivité sans échauffement	378
13.7.2	Échauffement et emballement des électrons	381
13.8	Autres coefficients de transport	385
13.9	Appendices	387
A13-1	Coefficients de transport dans l'espace des vitesses .	387
A13-2	Équation de Landau	394

A13-3	“Maxwellianisation” des électrons ou des ions par self-interaction	395
A13-4	Écriture de l'équation de Landau sous la forme de Fokker-Planck	398
13.10	Problèmes	399
P13-1	Linéarisation de l'équation de Fokker-Planck	399
P13-2	Conductivité électrique de Lorentz	399
P13-3	Conductivité thermique de Lorentz	399
14	Plasmas et rayonnement	401
14.1	Introduction	401
14.2	Émission de rayonnement par les électrons libres	403
14.2.1	Champs d'une particule chargée (formules relativistes)	403
14.2.2	Rayonnement d'une particule non relativiste ($v \ll c$)	406
14.3	Rayonnement cyclotron	410
14.3.1	Puissance totale rayonnée	410
14.3.2	Distribution spectrale et angulaire	411
14.3.3	Discussion des approximations	412
14.3.4	Corrections relativistes	413
14.4	Bremsstrahlung électron-neutre	413
14.4.1	Remarques préliminaires	413
14.4.2	Bremsstrahlung électron-neutre	414
14.5	Bremsstrahlung électron-ion ($v \ll c$)	418
14.5.1	Quelques quantités fondamentales	418
14.5.2	Puissance totale rayonnée	419
14.5.3	Dépendance spectrale	421
14.5.4	Effets de dispersion	426
14.5.5	Théorie quantique	427
14.5.6	Longueurs d'absorption	428
14.6	Description d'un champ de rayonnement dans le vide	429
14.6.1	Intensité spécifique et distribution photonique	429
14.6.2	Quantités macroscopiques associées au rayonnement	433
14.6.3	Anisotropies de I_ν . Champs de rayonnement isotrope	434
14.7	Description d'un champ de rayonnement dans un plasma	437
14.7.1	Microchamps et macrochamps	437
14.7.2	Ondes dans un plasma homogène	438
14.7.3	Plasmas faiblement inhomogènes	438
14.7.4	Grandeurs hydrodynamiques radiatives	439
14.7.5	Plasma à l'équilibre thermodynamique	439
14.8	Transfert radiatif dans un plasma	440

14.8.1	L'équation de transfert	440
14.8.2	Théorie cinétique et hydrodynamique des photons	445
14.8.3	Analyse des termes collisionnels des photons	448
14.8.4	Approximations physiques du transfert radiatif	453
14.9	Classification des plasmas en hydrodynamique radiative	457
14.9.1	Équation de Boltzmann pour les photons	457
14.9.2	Densités d'énergie	459
14.9.3	Longueurs d'interaction photon-électron	460
14.9.4	Longueurs d'interaction des électrons	461
14.9.5	Familles de plasmas	462
14.10	Interactions laser-matière à très haut flux	465
14.10.1	Propriétés des lasers de grande puissance	465
14.10.2	Effets stimulés dans les interactions $h\nu-e$	465
14.10.3	Effets multiphotoniques sur les atomes	466
14.10.4	Oscillation relativiste des électrons dans une onde	466
14.10.5	Effets multiphotoniques sur les particules	467
14.11	Appendices	467
A14-1	Développement de I_ν en harmoniques sphériques	467
14.12	Problèmes	468
P14-1	Champs de convection	468
P14-2	Refroidissement par rayonnement cyclotron	469
P14-3	Pertes d'énergie dans les collisions $e-o$	469
P14-4	Bremsstrahlung électron-neutre	470
P14-5	Opérateur de Lorentz pour $h\nu-e$	470
P14-6	Libre parcours moyen de Rosseland	470
P14-7	Opérateur de Boltzmann avec effets stimulés	470
	Bibliographie	473
	Crédits des figures	488
	Index	489

Contenu du tome 1

1	Gaz ionisés et plasmas	1
1.1	Introduction	1
1.1.1	Historique	1
1.1.2	Plan du chapitre	4
1.2	Gaz ionisés et plasmas	5

1.2.1	Degré d'ionisation	5
1.2.2	Ionisation thermique d'un gaz	7
1.2.3	Plasmas hors d'équilibre thermique	8
1.2.4	Densité et température des plasmas usuels	9
1.2.5	Familles de gaz ionisés	9
1.3	Oscillations de plasma	11
1.3.1	Description qualitative	11
1.3.2	Oscillations de charge d'espace électronique en volume	13
1.3.3	Oscillations de gaine	15
1.3.4	Impédance d'un plasma et ondes électromagnétiques	17
1.4	Longueurs de Debye et de Landau	20
1.4.1	Longueurs critiques d'interaction	20
1.4.2	Gaines à la frontière d'un plasma	24
1.4.3	Corrélations de position dans un plasma	26
1.5	Plasmas sans interactions. Trajectoires des particules	31
1.6	Plasmas avec interactions coulombiennes	32
1.6.1	Classification des plasmas	33
1.6.2	Collisions coulombiennes. Fréquences caractéristiques	36
1.7	Ondes dans les plasmas	40
1.7.1	Ondes planes dans un plasma	40
1.7.2	Plasma sans champ magnétique. Fréquence de coupure	41
1.7.3	Propagation parallèle à un champ magnétique	43
1.7.4	Propagation oblique et transversale	44
1.7.5	Classification des plasmas par rapport aux ondes	46
1.8	Plasmas et rayonnement	48
1.8.1	Émission de rayonnement par les plasmas	48
1.8.2	Interactions entre photons et matière	49
1.9	Gaz faiblement ionisés	51
1.10	Fusion thermonucléaire contrôlée	53
1.10.1	Réaction de fusion des noyaux légers	53
1.10.2	Réacteurs nucléaires à fusion contrôlée	56
1.10.3	Confinement magnétique d'un plasma	58
1.10.4	Confinement inertiel d'un plasma	61
1.11	Décharges électriques dans les gaz	65
1.11.1	Décharges en courant continu à basse pression	65
1.12	Problèmes	75
P1-1	Distribution maxwellienne des vitesses	75
P1-2	Distribution gaussienne et théorème de la limite centrale	77
P1-3	Démonstration simple de l'équation de Saha	77
P1-4	Gaines de plasma et sondes de Langmuir	78

P1-5	Énergie potentielle d'un plasma	81
P1-6	Grandeurs caractéristiques dans un plasma	82
2	Trajectoires dans un champ magnétique	83
2.1	Introduction	83
2.2	Champ magnétique uniforme constant	85
2.2.1	Trajectoires hélicoïdales	85
2.2.2	Moment magnétique orbital. Diamagnétisme du plasma	89
2.2.3	Valeurs numériques	92
2.3	Champs magnétique et électrique uniformes et constants	93
2.3.1	Dérive électrique	93
2.3.2	Dérives produites par un champ de gravité	97
2.4	Champs magnétique uniforme constant et électrique oscillant	99
2.4.1	Approximation du champ électrique uniforme	99
2.4.2	Conductivité électrique. Résonance cyclotron	100
2.5	Champ magnétique lentement variable. Orbites adiabatiques	101
2.5.1	Approximation adiabatique	101
2.5.2	Orbites adiabatiques	103
2.6	Compression magnétique. Gel de B . Invariance de μ	104
2.6.1	Mouvement des tubes de force	104
2.6.2	Gel du plasma dans les tubes de force	105
2.6.3	Invariance de μ . Compression magnétique	107
2.7	Champ magnétique statique non uniforme	110
2.7.1	Orbites adiabatiques tracées sur les tubes de force	110
2.7.2	Miroirs magnétiques	112
2.8	Dérives	115
2.8.1	Dérives électriques et dérives gravitationnelles	115
2.8.2	Dérive de courbure magnétique	115
2.8.3	Dérive de gradient de B	116
2.9	Invariants adiabatiques	119
2.9.1	Pseudo-périodes et invariants adiabatiques	119
2.10	Constantes exactes du mouvement	122
2.10.1	Équations de Lagrange	122
2.10.2	Champ statique à symétrie de révolution	123
2.11	Appendices	125
A2-1	Conductivité d'un plasma froid sans collisions	125
A2-2	Résonance cyclotron	127
A2-3	Propriétés du gradient d'un champ de vecteurs	130
A2-4	Champ statique de révolution avec deux miroirs	131
2.12	Problèmes	138
P2-1	Calcul relativiste de la dérive électrique	138

P2-2	Adiabaticité temporelle dans une compression magnétique	138
P2-3	Calcul de la force de freinage dans un miroir magnétique	139
P2-4	Calcul de la force (moyenne) de gradient	139
P2-5	Dérive magnétique avec diamagnétisme	139
P2-6	Puissance transmise par un champ alternatif à un plasma	139
P2-7	Résonance cyclotron électronique	140
P2-8	Deuxième invariant adiabatique	140
3	Collisions élastiques	141
3.1	Introduction	141
3.2	Théorie classique des collisions binaires élastiques	142
3.2.1	Mouvement du centre de gravité et mouvement relatif	142
3.2.2	Propriétés du mouvement relatif	145
3.2.3	Potentiels d'interaction dans un gaz ionisé	149
3.2.4	Exemples de calcul de la déviation	150
3.3	Section efficace différentielle angulaire	153
3.3.1	Définition de la section efficace différentielle	153
3.3.2	Section efficace et paramètre d'impact	157
3.4	Sections efficaces en mécanique quantique	159
3.4.1	Diffusion de l'onde de de Broglie par un centre fixe	159
3.4.2	Ondes partielles ; déphasages	160
3.4.3	Remarques	161
3.4.4	Cas des particules identiques	161
3.5	Sections efficaces intégrées	162
3.5.1	Définitions	162
3.5.2	Divergence coulombienne de σ_1 . Coupure de Debye	164
3.5.3	Résultats expérimentaux	169
3.6	Appendices	173
A3-1	Système du laboratoire et système du centre de gravité	173
A3-2	Sections efficaces de transport et déphasages	177
3.7	Problèmes	180
P3-1	Collisions avec un potentiel attractif en $1/r^4$	180
P3-2	Section efficace pour l'échange d'énergie	180
P3-3	Méthode des faisceaux mélangés	180
4	Collisions inélastiques	181
4.1	Introduction	181
4.2	Particules présentes dans un gaz ionisé. Niveaux d'énergie	181
4.2.1	Niveaux d'énergie des atomes	181

4.2.2	Niveaux d'énergie des molécules	182
4.2.3	Ions négatifs	186
4.3	Seuils de réaction	188
4.3.1	Énergie de réaction	188
4.3.2	Seuils de réaction	188
4.3.3	Collisions binaires. Cas du système du laboratoire	190
4.4	Principaux types de collisions inélastiques	190
4.5	Collisions inélastiques binaires	191
4.5.1	Section efficace totale	191
4.5.2	Taux de réaction	195
4.6	Collisions inélastiques ternaires	197
4.7	Information sur les sections efficaces et les taux de réaction	199
4.8	Problèmes	200
P4-1	Constante de réaction pour deux distributions max- welliennes	200
P4-2	Relation graphique entre les courbes de sections ef- ficaces inélastique et superélastique	200
5	Propriétés macroscopiques des gaz faiblement ionisés	201
5.1	Introduction	201
5.2	Mobilité et diffusion libre des électrons	202
5.2.1	Équation de transport de la quantité de mouvement des électrons	202
5.2.2	Mobilité des électrons	203
5.2.3	Diffusion libre des électrons	206
5.2.4	Relation d'Einstein. Température de diffusion	207
5.3	Mobilité et diffusion libre des ions	208
5.4	Modes propres et longueurs de diffusion d'une cavité	213
5.4.1	Hypothèses générales	213
5.4.2	Équations générales	216
5.4.3	Évolution d'une post-décharge	217
5.5	Décharge HF dans une cavité	219
5.5.1	Régime transitoire	219
5.5.2	Régime stationnaire	220
5.6	Diffusion ambipolaire	223
5.6.1	Comparaison des coefficients de transport des électrons et des ions	223
5.6.2	Coefficient de diffusion ambipolaire dans un plasma contenant une seule espèce d'ions	224
5.6.3	Détermination du coefficient de proportionnalité. Domaine de validité de la diffusion ambipolaire par- faite	226

5.7	Colonnes de plasma contrôlées par diffusion	229
5.7.1	Formules générales et règles de similitude	229
5.7.2	Formules explicites pour une fréquence de collision constante	232
5.8	Colonnes de plasma en régime de chute libre	233
5.8.1	Limite du régime de Schottky vers les basses pressions	233
5.8.2	Régime de chute libre	234
5.9	Recombinaison en volume. Attachement	235
5.9.1	Généralités	235
5.9.2	Comparaison des pertes par diffusion et par recom- binaison en volume	236
5.9.3	Évolution de la densité dans un plasma en recombi- naison	237
5.9.4	Attachement électronique	238
5.10	Appendices	239
A5-1	Modes propres et longueurs de diffusion de cavités cylindriques ou parallélépipédiques	239
5.11	Problèmes	241
P5-1	Création d'un plasma par un faisceau d'électrons . .	241
P5-2	Colonne positive (modèle simple)	243
P5-3	Diffusion ambipolaire avec plusieurs espèces d'ions .	243

6 Faisceaux d'électrons : ondes et instabilités

	électrostatiques	245
6.1	Introduction	245
6.2	Dynamique à une dimension	247
6.2.1	Équations générales non linéaires	247
6.2.2	Modes propres du faisceau	248
6.3	Énergie et flux d'énergie associés aux ondes	253
6.3.1	Énergie et modèle linéaire	253
6.3.2	Énergie dans les ondes rapides et lentes	254
6.3.3	Énergie associée aux ondes	256
6.3.4	Conservation de l'énergie de perturbation	257
6.4	Excitation et stabilité des ondes	261
6.4.1	Grilles "dipolaires"	261
6.4.2	Grilles séparées par une distance finie ; faisceaux de sections transversales finies	264
6.5	Instabilité faisceau-milieu dissipatif	267
6.5.1	Équation de dispersion	268
6.5.2	Cas des faibles dissipations	269
6.5.3	Conservation de l'énergie avec petite dissipation . .	274
6.5.4	Flux d'énergie dans l'amplificateur résistif	276

approximation WKB 180
 orthogonalité 180, 228
 spectre continu et discret 179
 relation avec Landau 177
 Variables fluides globales 58
 Viscosité 57
 Vitesse
 d'Alfvén 44
 d'énergie 259, 438
 de fluide et anisotropies 332
 de groupe 259, 147, 151, 174, 439
 de piégeage 191
 du son 43
 Vlasov-Maxwell (modèle de) 107
 cf. aussi équation de Vlasov
 propriétés 108-122
 Vlasov-Maxwell en 3 dimensions 164
 cf. aussi Ondes
 Vlasov-Poisson en 1 dimension 122

collisions 181
 effets non linéaires 188
 évolution asymptotique 138
 excitation externe 139
 fonction de Green 130
 Fourier-Laplace 124
 linéarisé 123
 modes faiblement variables 145
 modes naturels 129, 145-148, 162
 non linéaire 123
 perturbations spatiales périodiques 131
 relation de dispersion 129
 réponse linéaire 127
 réponses forcées 129

Z

Zakharov (modèle) 214

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.