



SCIENCES SUP

Cours et applications

Licence • Master • Écoles d'ingénieurs

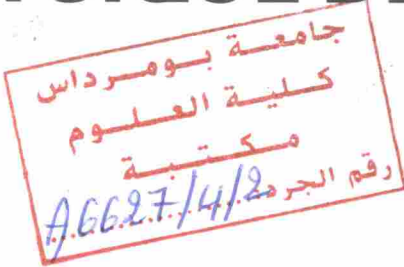
PHYSIQUE DES PLASMAS

Préface de Bernard Bigot

Jean-Marcel Rax

DUNOD

PHYSIQUE DES PLASMAS



Cours et applications

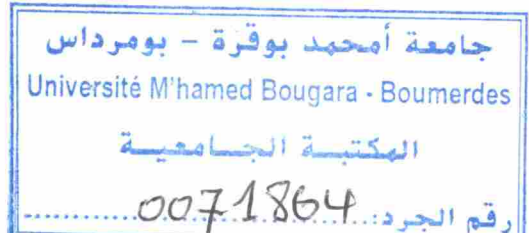
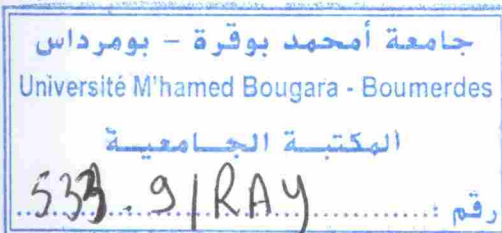
Jean-Marcel Rax

Professeur à l'université de Paris XI
Directeur du laboratoire de physique
et technologie des plasmas
de l'École Polytechnique

Préface de

Bernard Bigot

Haut-commissaire à l'énergie atomique



4exp.

DUNOD

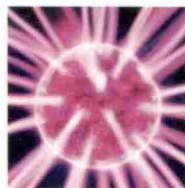
Table des matières

CHAPITRE 1 • ÉLECTRONS, IONS ET PLASMAS	1
1.1 Physique des plasmas	1
1.1.1 Environnement	2
1.1.2 Origines et histoire	7
1.1.3 Ordres de grandeur	10
1.2 Technologie des plasmas	15
1.2.1 Réacteurs	20
1.2.2 Tokamaks	24
1.2.3 Propulseurs	29
CHAPITRE 2 • CHAMPS, PARTICULES ET FLUIDES	36
2.1 Électrodynamique	37
2.1.1 Conduction et diffusion	40
2.1.2 Polarisation et magnétisation	48
2.2 Physique statistique	55
2.2.1 Fonctions de distribution	55
2.2.2 Hiérarchie de Bogolioubov	58
2.2.3 Distribution de Maxwell	61
2.3 Hydrodynamique	65
2.3.1 Théorème de Lagrange	66
2.3.2 Équation d'Euler	69
CHAPITRE 3 • PHÉNOMÈNES COLLECTIFS	74
3.1 Perturbation électronique	77
3.1.1 Fréquence de Langmuir	77
3.1.2 Éclatement coulombien	79

3.2	Écrantage électrique	81
3.2.1	Longueur de Debye	81
3.2.2	Sphère de Debye	85
3.3	Écrantage magnétique	86
3.3.1	Longueur de London	86
3.4	Perturbation magnétique	89
3.4.1	Vitesse d'Alfvén	89
3.4.2	Onde d'Alfvén	91
3.5	Perturbation ionique	93
3.5.1	Ondes acoustiques	93
3.5.2	Vitesse de Bohm	94
3.6	Relaxation électronique	96
3.6.1	Temps de Maxwell	96
3.6.2	Longueur de Kelvin	98
CHAPITRE 4 • COLLISIONS ET RÉACTIONS		
4.1	Section efficace	102
4.1.1	Section efficace de réaction	102
4.1.2	Section efficace de diffusion	102
4.1.3	Libre parcours moyen	104
4.2	Collisions élastiques	105
4.2.1	Diffusion élastique	108
4.2.2	Diffusion Rutherford	108
4.2.3	Interaction électron-atome	112
4.3	Collisions inélastiques	118
4.3.1	Seuil de réaction	124
4.3.2	Ionisation et réactivité	124
4.4	Théorie du libre parcours moyen	125
4.4.1	Viscosité, mobilité, diffusion	134
4.4.2	Coefficients de Townsend	134
CHAPITRE 5 • INTERACTIONS CHAMPS-PARTICULES		
5.1	Mouvement cyclotronique	147
5.1.1	Rayon de Larmor	148
5.1.2	Moment magnétique	148
5.1.3	Force diamagnétique	150
5.2	Dérives électromagnétiques	151
5.2.1	Dérives électriques	154
5.2.2	Dérives magnétiques	154
5.3	Force pondéromotrice	156
5.3.1	Champ longitudinal	166
5.3.2	Champ transverse	166
5.4	Invariants adiabatiques	167
5.4.1	Intégrale d'action	168
5.4.2	Invariant longitudinal	168
5.4.3	Invariant de flux	172
		174

CHAPITRE 6 • DYNAMIQUE ET STRUCTURES ÉLECTRIQUES	179
6.1 Modèles cinétiques et fluides	180
6.1.1 Réduction fluide	180
6.1.2 Nombre de Knudsen	184
6.2 Mobilité, diffusion, ionisation	189
6.2.1 Mobilité et diffusion	189
6.2.2 Loi de Paschen	194
6.2.3 Ondes d'ionisation	202
6.3 Structures quasi-neutres	205
6.3.1 Diffusion ambipolaire	205
6.3.2 Modèles de Schottky	208
6.3.3 Modèle de Tonks-Langmuir	213
6.4 Gaines ioniques	215
6.4.1 Critère de Bohm	215
6.4.2 Lois de Child-Langmuir	217
CHAPITRE 7 • DYNAMIQUE ET STRUCTURES MAGNÉTIQUES	225
7.1 Magnétohydrodynamique	225
7.1.1 Réduction MHD	225
7.1.2 Pression magnétique	230
7.2 Diffusion magnétique	234
7.2.1 Nombre de Reynolds	234
7.2.2 Diffusion du plasma	236
7.2.3 Diffusion du champ	237
7.3 Théorèmes d'Alfvén	239
7.3.1 Théorème du flux	239
7.3.2 Théorème du gel	241
7.4 Équilibres MHD	245
7.4.1 Équilibre MHD	245
7.4.2 Équilibres cylindriques	246
7.5 Hélicité et topologie	250
7.5.1 Enlacement	250
7.5.2 Équilibres sans forces	254
CHAPITRE 8 • ONDES, OSCILLATIONS ET RÉSONANCES	258
8.1 Ondes électromagnétiques	258
8.1.1 Résonances hybrides	260
8.1.2 Vecteur de Poynting	265
8.1.3 Vitesse de groupe	276
8.2 Modes électroniques et ioniques	279
8.2.1 Photons, plasmons, phonons	280
8.2.2 Modes électroniques magnétisés	284
8.2.3 Modes ioniques magnétisés	291
8.2.4 Coupures et résonances	294

8.3	Irréversibilité et non-linéarités	297
8.3.1	Absorption Landau	297
8.3.2	<i>Bremsstrahlung</i> inverse	300
8.3.3	Absorption résonante	303
8.3.4	Génération de plasmons	305
CHAPITRE 9 • COLLISIONS, RELAXATION ET TRANSPORT		309
9.1	Systèmes markoviens	310
9.1.1	Probabilités de transition	310
9.1.2	Équation de Boltzmann	313
9.1.3	Équation de Fokker-Planck	316
9.2	Interaction particules-particules	321
9.2.1	Transfert d'énergie-impulsion	322
9.2.2	Équation de Landau	328
9.2.3	Équation de l'EEDF	331
9.3	Processus cinétiques	334
9.3.1	Ralentissements	334
9.3.2	Isotropisation	338
9.3.3	Alphas thermonucléaires	341
9.3.4	Électrons relativistes	344
9.4	Fluctuations et turbulence	346
9.4.1	Relation de Green-Kubo	346
9.4.2	Collisions et turbulence	348
CHAPITRE 10 • ADIABATICITÉ, RÉSONANCES ET CHAOS		353
10.1	Systèmes hamiltoniens	353
10.1.1	Équations de Hamilton	353
10.1.2	Intégrale d'action	358
10.1.3	Invariants de Poincaré	364
10.2	Intégrabilité	368
10.2.1	Transformations canoniques	368
10.2.2	Variables angles et actions	370
10.2.3	Relation d'Einstein	375
10.2.4	Interactions électromagnétiques	377
10.3	Adiabaticité	386
10.3.1	Perturbations adiabatiques	387
10.3.2	Dérives et forces séculaires	390
10.3.3	Confinement magnétique	394
10.4	Résonances	397
10.4.1	Résonances linéaires	397
10.4.2	Résonances Landau	399
10.4.3	Résonances cyclotron	403
10.5	Chaos	407
10.5.1	Critère de Chirikov	407
10.5.2	Transition vers le chaos	410
10.5.3	Équation quasi-linéaire	414
INDEX		423



Jean-Marcel Rax

Préface de Bernard Bigot

PHYSIQUE DES PLASMAS

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants en master (M1 et M2) et licence (L3) ainsi qu'aux élèves des écoles d'ingénieurs. Il est issu d'un cours de physique des plasmas dispensé ces dernières années devant différents auditoires : à l'université de Paris XI (L3, M1 et M2), à l'École Normale Supérieure de Cachan (L3), à l'École Polytechnique (M2), à l'École Centrale (M1) et à l'École Supérieure d'Électricité (L3).

Il est d'usage de structurer la physique des plasmas en trois domaines et de distinguer respectivement : la physique des plasmas industriels (réacteurs pour les nanotechnologies et propulseurs spatiaux), la physique des plasmas naturels (environnement terrestre et astrophysique) et la physique des plasmas thermonucléaires (tokamak et interaction laser-plasma). Ces trois domaines possèdent en commun un ensemble d'outils, de méthodes et de résultats constituant la physique des plasmas. Ce cours, à vocation généraliste, est construit autour de cet ensemble de connaissances et résultats communs à ces trois domaines.

Il peut être adopté comme manuel de base aux niveaux L3 et M1 ou comme monographie de référence pour les ingénieurs et chercheurs confrontés à des problèmes de physique des plasmas.

JEAN-MARCEL RAX
est professeur à l'université de Paris XI et directeur du laboratoire de physique et technologie des plasmas de l'École Polytechnique.

