

Tome III

XV OPÉRATEURS DE CRÉATION ET D'ANNIHILATION POUR DES PARTICULES IDENTIQUES	1607
A Formalisme général	1608
B Opérateurs symétriques à une particule	1620
C Opérateurs à deux particules	1625
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1635
A_{XV} Particules et trous	1639
1 Etat fondamental d'un gaz de fermions sans interactions	1639
2 Nouvelle définition des opérateurs de création et d'annihilation	1640
3 Vide d'excitations	1641
B_{XV} Gaz parfait en équilibre thermique; fonctions de distribution quantiques	1643
1 Description grand-canonique d'un système sans interactions	1644
2 Valeurs moyennes des opérateurs symétriques à une particule	1646
3 Opérateurs à deux particules	1650
4 Nombre total de particules	1653
5 Equation d'état, pression	1659
C_{XV} Systèmes de bosons condensés, équation de Gross-Pitaevskii	1663
1 Notations, ket variationnel	1663
2 Une première approche	1665
3 Généralisation, calcul en notation de Dirac	1668
4 Discussion physique	1671
D_{XV} Équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps	1679
1 Evolution temporelle	1679
2 Analogie hydrodynamique	1686
3 Ecoulements métastables, superfluidité	1689
E_{XV} Systèmes de fermions, approximation de Hartree-Fock	1701
1 Les bases de la méthode	1702
2 Généralisation : méthode opératorielle	1713
F_{XV} Fermions, Hartree-Fock dépendant du temps	1727
1 Ket variationnel et notations	1727
2 Méthode variationnelle	1728
3 Calcul de l'optimisateur	1731
4 Equations du mouvement	1733
G_{XV} Fermions ou bosons : équilibre thermique en champ moyen	1737
1 Principe variationnel	1738
2 Approximation de l'opérateur densité à l'équilibre	1742
3 Equations de champ moyen dépendant de la température	1752

H_{XV}	Applications de la méthode du champ moyen à température non nulle	1761
1	Hartree-Fock à température non nulle, bref rappel	1761
2	Système homogène	1762
3	Magnétisme spontané de fermions répulsifs	1765
4	Bosons : équation d'état, instabilité attractive	1774

XVI	OPÉRATEUR CHAMP	1779
A	Définition de l'opérateur champ	1780
B	Opérateurs symétriques	1783
C	Evolution dans le temps de l'opérateur champ (point de vue de Heisenberg)	1792
D	Lien avec la quantification d'un champ	1794
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1797
A_{XVI}	Corrélations spatiales dans un gaz parfait de bosons ou de fermions	1799
1	Système dans un état de Fock	1799
2	Fermions dans l'état fondamental	1802
3	Bosons dans un état de Fock	1806
B_{XVI}	Fonctions de corrélation, fonctions de Green	1811
1	Fonctions de Green dans l'espace ordinaire	1811
2	Transformées de Fourier	1820
3	Fonction spectrale, règle de somme	1826
C_{XVI}	Théorème de Wick	1831
1	Démonstration du théorème	1831
2	Applications : fonctions de corrélation d'un gaz parfait	1836

XVII	ÉTATS APPARIÉS DE PARTICULES IDENTIQUES	1843
A	Opérateurs création et annihilation d'une paire de particules	1846
B	Construction d'états appariés	1850
C	Propriétés des kets caractérisant les paires d'états	1855
D	Corrélations entre particules, fonction d'onde de paires	1863
E	Les états appariés comme vide de quasi-particules; transformations de Bogolubov-Valatin	1869
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	1877
A_{XVII}	Opérateur champ de paires de particules identiques	1879
1	Opérateurs de création et d'annihilation de paires	1880
2	Valeurs moyennes dans un état apparié	1885
3	Relations de commutation des opérateurs champ	1896

B_{XVII}	Energie moyenne dans un état apparié	1903
1	Utilisation d'états qui ne sont pas états propres du nombre total de particules	1903
2	Hamiltonien	1905
3	Fermions de spin 1/2 dans un état singulet	1908
4	Bosons de spin nul	1915
C_{XVII}	Appariement de fermions, théorie BCS	1923
1	Optimisation de l'énergie	1925
2	Fonctions de distribution, corrélations	1934
3	Discussion physique	1949
4	Etats excités	1954
D_{XVII}	Paires de Cooper	1963
1	Le modèle de Cooper	1963
2	Vecteur d'état et hamiltonien	1963
3	Solution de l'équation aux valeurs propres	1965
4	Calcul de l'énergie de liaison dans un cas simple	1965
E_{XVII}	Bosons répulsifs condensés	1969
1	Etat variationnel, énergie	1971
2	Optimisation	1973
3	Propriétés de l'état fondamental	1976
4	Méthode opératorielle de Bogolubov	1987

XVIII	RAPPELS D'ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE	1993
A	Electrodynamique classique	1995
B	Description du champ transverse comme un ensemble d'oscillateurs harmoniques	2004
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS		2013
A_{XVIII}	Formulation lagrangienne de l'électrodynamique	2015
1	Lagrangien avec divers types de variables	2016
2	Application au champ de rayonnement libre	2022
3	Lagrangien du système global champ + particules en interaction	2028

XIX	QUANTIFICATION DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE	2033
A	Quantification du rayonnement en jauge de Coulomb	2035
B	Les photons, excitations élémentaires du champ quantique libre	2041
C	Description des interactions	2046
GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS		2055

A_{XIX}	Echanges d'impulsion entre atomes et photons	2057
1	Recul d'un atome libre absorbant ou émettant un photon	2058
2	Applications de la force de pression de radiation : ralentissement et refroidissement des atomes	2063
3	Blocage du recul par un confinement spatial	2074
4	Suppression du recul dans certains processus multiphotoniques	2079
B_{XIX}	Moment cinétique du rayonnement	2083
1	Valeur moyenne du moment cinétique pour une particule de spin 1	2084
2	Moment cinétique du rayonnement libre classique en fonction des variables normales	2087
3	Discussion physique	2090
C_{XIX}	Echanges de moment cinétique entre atomes et photons	2097
1	Transfert de moment cinétique de spin aux variables atomiques internes	2098
2	Les méthodes optiques	2100
3	Transfert de moment cinétique orbital aux variables atomiques externes	2107

XX	ABSORPTION, ÉMISSION, ET DIFFUSION DE PHOTONS	
	PAR UN ATOME	2109
A	Outil de base : l'opérateur d'évolution	2110
B	Absorption de photons entre deux niveaux atomiques discrets	2115
C	Processus d'émission induite et d'émission spontanée	2122
D	Rôle des fonctions de corrélation dans les processus à un photon	2126
E	Diffusion de photons par un atome	2128
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	2139
A_{XX}	Exemple de processus multiphotonique : absorption à deux photons	2141
1	Rayonnement monochromatique	2141
2	Rayonnement non monochromatique	2145
3	Discussion physique	2149
B_{XX}	Photo-ionisation	2153
1	Brefs rappels sur l'effet photo-électrique	2154
2	Calcul des taux de photo-ionisation	2155
3	Une théorie quantique du rayonnement est-elle essentielle pour décrire la photo-ionisation?	2162
4	Photo-ionisation à deux photons	2168
5	Ionisation tunnel avec des champs laser intenses	2172
C_{XX}	Atome à deux niveaux dans un champ monochromatique.	
	Méthode de l'atome habillé	2173
1	Brève description de la méthode de l'atome habillé	2175
2	Domaine des couplages faibles	2181
3	Domaine des couplages forts	2186
4	Modifications du champ. Dispersion et absorption	2192

D_{XX}	Les déplacements lumineux : un outil pour manipuler les atomes et le champ	2197
1	Forces dipolaires et pièges laser	2197
2	Miroirs pour atomes	2199
3	Réseaux optiques	2200
4	Refroidissement sub-Doppler. Effet Sisyphe	2201
5	Détection non destructive d'un photon	2205
E_{XX}	Détection de paquets d'ondes à un ou deux photons, interférences	2209
1	Paquets d'ondes à un photon, probabilité de photo-détection	2211
2	Signaux d'interférence à un ou deux photons	2214
3	Amplitude d'absorption d'un photon par un atome	2220
4	Diffusion d'un paquet d'ondes	2222
5	Exemple de paquet d'ondes à deux photons intriqués	2227

XXI	INTRICATION QUANTIQUE, MESURES, INÉGALITÉS DE BELL	2235
A	Notion d'intrication, buts de ce chapitre	2236
B	Etats intriqués d'un système de deux spins 1/2	2238
C	Intrication entre systèmes physiques quelconques	2241
D	Mesure idéale et états intriqués	2245
E	Expériences "quel chemin" : peut-on identifier le chemin suivi par le photon dans l'expérience des fentes d'Young?	2251
F	Intrication, non-localité, théorème de Bell	2253
	GUIDE DE LECTURE DES COMPLÉMENTS	2263
A_{XXI}	Opérateur densité et corrélations ; séparabilité	2265
1	Entropie statistique de von Neumann	2265
2	Différences entre corrélations classiques et quantiques	2268
3	Séparabilité	2271
B_{XXI}	Etats GHZ, échange d'intrication	2275
1	Désaccord de signe dans un état GHZ	2275
2	Échange d'intrication	2280
C_{XXI}	Emergence d'une phase relative sous l'effet de processus de détection	2285
1	Probabilités des mesures de position simple, double, etc.	2286
2	Augmentation de l'intrication sous l'effet du processus de détection	2291
3	Détection d'un grand nombre de particules Q	2293
D_{XXI}	Emergence d'une phase relative sur des condensats à spin, argument EPR et non-localité macroscopiques	2301
1	Deux condensats à spin	2302
2	Probabilités des différents résultats de mesure	2304
3	Discussion	2308

APPENDICES	2315
IV Intégrale de chemins de Feynman	2315
1 Propagateur quantique d'une particule	2316
2 Interprétation en termes d'histoires classiques	2320
3 Discussion ; une nouvelle règle de quantification	2322
4 Opérateurs	2324
V Multiplicateurs de Lagrange	2329
1 Fonction de deux variables	2329
2 Fonction de N variables	2331
VI Rappels de mécanique statistique quantique	2333
1 Ensembles statistiques	2333
2 Variables intensives ou extensives ; valeur des grandeurs physiques . . .	2341
VII Transformée de Wigner	2347
1 Fonction delta d'un opérateur	2349
2 Distribution de Wigner de l'opérateur densité (particule sans spin) . . .	2350
3 Transformée de Wigner d'un opérateur	2361
4 Généralisations	2369
5 Discussion physique, distribution de Wigner et effets quantiques	2370
BIBLIOGRAPHIE DU TOME III	2377
INDEX	2383