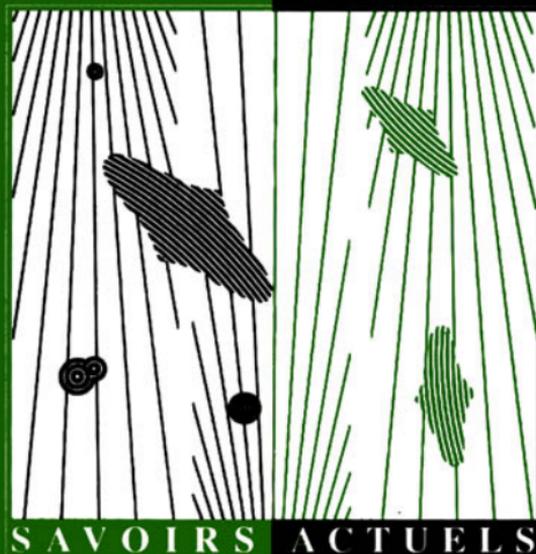


PHYSIQUE

Claude COHEN-TANNOUDJI
Jacques DUPONT-ROC — Gilbert GRYNBERG

Photons • et atomes •

*Introduction à
l'électrodynamique quantique*



 CNRS EDITIONS


EDP
SCIENCES

Photons et atomes

Introduction à l'électrodynamique quantique

Claude Cohen-Tannoudji
Jacques Dupont-Roc
Gilbert Grynberg

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

EDP Sciences / CNRS ÉDITIONS

© 2001, **EDP Sciences**, 7 avenue du Hoggar, BP 112, PA de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A.
CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

1^{re} édition :
© 1987, **InterÉditions** – **CNRS ÉDITIONS**

Tous droits réservés. Aucun extrait de ce livre ne peut être reproduit, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (machine électronique, mécanique, à photocopier, à enregistrer ou toute autre) sans l'autorisation écrite préalable des éditeurs.

ISBN : 2-86883-535-X
ISBS : 2-222-03966-5

Table des matières

<i>Avant-propos</i>	1
<i>Introduction</i>	3

I

ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE ÉQUATIONS DE BASE ET VARIABLES DYNAMIQUES FONDAMENTALES

<i>Introduction</i>	7
A. Equations de base dans l'espace ordinaire	9
1. Equations de Maxwell-Lorentz	9
2. Quelques constantes du mouvement importantes	10
3. Potentiels - Invariance de jauge	10
B. Electrodynamique dans l'espace réciproque	13
1. Transformation de Fourier spatiale - Notations	13
2. Equations des champs dans l'espace réciproque	14
3. Champs vectoriels longitudinaux et transverses	15
4. Champs électrique et magnétique longitudinaux	17
5. Contribution du champ électrique longitudinal à l'énergie totale, à l'impulsion totale et au moment cinétique total - <i>a. Energie totale.</i> <i>b. Impulsion totale. c. Moment cinétique total</i>	19
6. Equations du mouvement des champs transverses	23
C. Variables normales	25
1. Idée générale	25
2. Définition des variables normales	25
3. Equation d'évolution des variables normales	26
4. Expression des observables physiques du champ transverse en fonc- tion des variables normales - <i>a. Energie du champ transverse.</i> <i>b. Impulsion et moment cinétique du champ transverse. c. Champs</i> <i>électrique et magnétique transverses dans l'espace réel. d. Potentiel</i> <i>vecteur transverse</i>	28

5. Analogies et différences entre les variables normales et la fonction d'onde d'une particule de spin 1 dans l'espace réciproque	32
6. Conditions aux limites périodiques. Introduction de notations plus simples	33
D. Conclusion : discussion de quelques méthodes possibles de quantification	35

COMPLÉMENT A_I — LA FONCTION « DELTA TRANSVERSE »

1. Définition dans l'espace réciproque - <i>a. Base cartésienne, base transverse et longitudinale. b. Projecteur sur le sous-espace des champs transverses</i>	38
2. Expression de la fonction delta transverse dans l'espace réel - <i>a. Régularisation de $\delta^{\perp}_{ij}(\rho)$. b. Calcul de $g(\rho)$. c. Calcul des dérivées de $g(\rho)$. d. Discussion de l'expression de $\delta^{\perp}_{ij}(\rho)$</i>	40
3. Application au calcul du champ magnétique créé par une densité de magnétisation. Interaction de contact	44

COMPLÉMENT B_I — MOMENT CINÉTIQUE DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE ONDES MULTIPOLAIRES

<i>Introduction</i>	47
1. Contribution du champ électrique longitudinal au moment cinétique total	47
2. Moment cinétique du champ transverse - <i>a. Expression de \mathbf{J}_{trans} dans l'espace réciproque. b. Expression en fonction des variables normales. c. Analogie avec la valeur moyenne du moment cinétique total d'une particule de spin 1</i>	49
3. Base de fonctions vectorielles de \mathbf{k} « adaptées » au moment cinétique - <i>a. Idée générale. b. Méthode de construction de fonctions propres vectorielles de \mathbf{J}^2 et J_z. c. Fonctions propres longitudinales. d. Fonctions propres transverses</i>	53
4. Application : ondes multipolaires dans l'espace réel - <i>a. Calcul de quelques transformées de Fourier. b. Ondes multipolaires électriques. c. Ondes multipolaires magnétiques</i>	57

COMPLÉMENT C_I — EXERCICES

1. H et P constantes du mouvement	63
2. Passage de la jauge de Coulomb à la jauge de Lorentz	65

3. Compensation entre le champ électrique longitudinal et le champ transverse instantané	66
4. Variables normales et potentiels retardés	68
5. Champ créé par une particule chargée en son propre emplacement. Réaction de rayonnement	70
6. Champ produit par un dipôle électrique oscillant	73
7. Section efficace de diffusion du rayonnement par un électron classique élastiquement lié	76

II

APPROCHE LAGRANGIENNE ET HAMILTONIENNE DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE LAGRANGIEN STANDARD ET JAUGE DE COULOMB

<i>Introduction</i>	81
A. Rappel sur le formalisme lagrangien et hamiltonien	83
1. Systèmes ayant un nombre fini de degrés de liberté - <i>a. Variables dynamiques, lagrangien et action. b. Equations de Lagrange. c. Lagrangiens équivalents. d. Moments conjugués et hamiltonien. e. Changement de variables dynamiques. f. Utilisation de coordonnées généralisées complexes. g. Coordonnées, impulsions et hamiltonien en mécanique quantique</i>	83
2. Système ayant un ensemble continu de degrés de liberté - <i>a. Variables dynamiques. b. Lagrangien. c. Equations de Lagrange. Moments conjugués et hamiltonien. e. Quantification. f. Formalisme hamiltonien et quantification avec des champs complexes</i>	92
B. Le lagrangien standard de l'électrodynamique classique	102
1. Expression du lagrangien standard - <i>a. Le lagrangien standard dans l'espace réel. b. Le lagrangien standard dans l'espace réciproque</i> ...	102
2. Dérivation des équations de l'électrodynamique classique à partir du lagrangien standard - <i>a. Equation de Lagrange pour les particules. b. Equation de Lagrange relative au potentiel scalaire. c. Equation de Lagrange relative au potentiel vecteur</i>	105
3. Propriétés générales du lagrangien standard - <i>a. Symétries globales. b. Invariance de jauge. c. Redondance des variations dynamiques</i> ..	107

C. Electrodynamique en jauge de Coulomb	113
1. Elimination des variables dynamiques redondantes du lagrangien standard - <i>a. Elimination du potentiel scalaire. b. Choix de la composante longitudinale du potentiel vecteur</i>	113
2. Le lagrangien en jauge de Coulomb	115
3. Formalisme hamiltonien - <i>a. Moments conjugués associés aux particules. b. Moments conjugués associés aux variables du champ. c. Hamiltonien en jauge de Coulomb. d. Les grandeurs physiques</i> ..	117
4. Quantification canonique en jauge de Coulomb - <i>a. Relations de commutation fondamentales. b. Importance de la transversalité dans le cas du champ électromagnétique. c. Opérateurs de création et d'annihilation</i>	120
5. Conclusion : quelques caractéristiques importantes de cette description de l'électrodynamique - <i>a. Les variables dynamiques sont indépendantes. b. Le champ électrique est séparé en champ de Coulomb et champ transverse. c. Le formalisme n'est pas manifestement covariant. d. L'interaction des particules avec les modes relativistes n'est pas correctement décrite</i>	123

COMPLÉMENT A_{II} — DÉRIVÉE FONCTIONNELLE INTRODUCTION SIMPLE ET QUELQUES APPLICATIONS

1. Passage d'un système discret à un système continu. Limite des dérivés partielles	128
2. Notion de dérivée fonctionnelle	130
3. Dérivée fonctionnelle de l'action et équations de Lagrange	130
4. Dérivée fonctionnelle du lagrangien d'un système continu	132
5. Dérivée fonctionnelle de l'hamiltonien d'un système continu	134

COMPLÉMENT B_{II} — SYMÉTRIES DU LAGRANGIEN EN JAUGE DE COULOMB ET CONSTANTES DU MOUVEMENT

1. Variation de l'action entre deux mouvements réels infiniment voisins	136
2. Constantes du mouvement dans un cas simple	138
3. Conservation de l'énergie totale pour le système charges + champ en interaction	139
4. Conservation de l'impulsion totale	140
5. Conservation du moment cinétique total	141

COMPLÉMENT C_{II} — ÉLECTRODYNAMIQUE EN PRÉSENCE D'UN CHAMP EXTÉRIEUR

1. Séparation du champ extérieur	143
2. Lagrangien en présence d'un champ extérieur - <i>a. Introduction d'un lagrangien. b. Le lagrangien en jauge de Coulomb</i>	144

3. Hamiltonien en présence d'un champ extérieur - <i>a. Les moments conjugués. b. Hamiltonien. c. Quantification</i>	145
--	-----

COMPLÉMENT D_{II} — EXERCICES

1. Exemple d'hamiltonien différent de l'énergie	148
2. Passage d'un système discret à un système continu : introduction des densités de lagrangien et d'hamiltonien	149
3. Equations de Lagrange pour les composantes du champ électromagnétique dans l'espace réel	152
4. Equations de Lagrange pour le lagrangien standard en jauge de Coulomb	153
5. Impulsion et moment cinétique d'un champ quelconque	154
6. Lagrangien de variables complexes, linéaire vis-à-vis des vitesses	156
7. Description lagrangienne et hamiltonienne du champ de matière de Schrödinger	159
8. Quantification du champ de Schrödinger	163
9. Equation de Schrödinger d'une particule dans un champ électromagnétique : arbitraire de phase et invariance de jauge	169

III ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN JAUGE DE COULOMB

<i>Introduction</i>	171
A. Cadre général	173
1. Variables dynamiques fondamentales. Relations de commutation ...	173
2. Expression des opérateurs associés aux diverses grandeurs physiques du système	173
3. Espace des états	177
B. Evolution temporelle	178
1. Point de vue de Schrödinger	178
2. Point de vue de Heisenberg. Les équations de Maxwell-Lorentz quantiques - <i>a. Equations de Heisenberg pour les particules. b. Equations de Heisenberg pour les champs. c. Avantages du point de vue de Heisenberg</i>	178
C. Observables et états du champ quantique libre	185
1. Revue de quelques observables du champ libre - <i>a. Energie totale et impulsion totale du champ. b. Champs en un point donné r de l'espace. c. Observables correspondant à des mesures photoélectriques</i>	185

2. Excitations élémentaires du champ quantique libre : photons - <i>a. Etats propres de l'énergie et de l'impulsion totales. b. Interprétation en termes de photons. c. Etats à un photon - Propagation</i>	188
3. Etude de quelques propriétés du vide - <i>a. Discussion qualitative. b. Valeurs moyennes et variances des champs dans le vide. c. Fluctuations du vide</i>	191
4. Etats quasi classiques - <i>a. Idée générale. b. Caractérisation des états quasi classiques. c. Quelques propriétés des états quasi classiques. d. Opérateur de translation pour a et a^+</i>	194
D. Hamiltonien d'interaction entre particules et champ	199
1. Hamiltonien des particules - Hamiltonien du rayonnement - Hamiltonien d'interaction	199
2. Ordres de grandeur des divers termes d'interaction pour des systèmes de particules liées	200
3. Règles de sélection	201
4. Introduction d'une coupure	202

**COMPLÉMENT A_{III} — ANALYSE DES PHÉNOMÈNES
D'INTERFÉRENCE EN THÉORIE QUANTIQUE
DU RAYONNEMENT**

<i>Introduction</i>	206
1. Présentation d'un modèle simple	207
2. Phénomènes d'interférence observables sur les signaux de photodétection simple - <i>a. Cas général. b. Etats quasi classiques. c. Etats factorisés. d. Etats à un seul photon</i>	209
3. Phénomènes d'interférence observables sur les signaux de photodétection double - <i>a. Etats quasi classiques. b. Etats à un seul photon. c. Etats à 2 photons</i>	211
4. Interprétation physique en termes d'interférences entre amplitudes de transition	215
5. Conclusion : la dualité onde-corpuscule en théorie quantique du rayonnement	217

**COMPLÉMENT B_{III} — CHAMP QUANTIQUE RAYONNÉ
PAR DES SOURCES CLASSIQUES**

1. Hypothèse sur les sources	219
2. Etude de l'évolution des champs dans le point vue de Heisenberg	220
3. Point de vue de Schrödinger - Etat quantique du champ à l'instant t	221

**COMPLÉMENT C_{III} — RELATIONS DE COMMUTATION
DES CHAMPS LIBRES À DES INSTANTS DIFFÉRENTS. SUSCEPTIBILITÉS
ET FONCTIONS DE CORRÉLATION DES CHAMPS DANS LE VIDE**

<i>Introduction</i>	223
1. Calcul préliminaire	224
2. Commutateurs des champs - <i>a. Réduction des expressions en fonction de D. b. Expressions explicite des commutateurs. c. Propriétés des commutateurs</i>	225
3. Fonctions de corrélation symétriques des champs dans le vide	229

COMPLÉMENT D_{III} — EXERCICES

1. Commutateurs de \mathbf{A} , \mathbf{E}_\perp , \mathbf{B} en jauge de Coulomb	232
2. Hamiltonien d'un système de 2 particules de charges opposées couplées au champ électromagnétique	234
3. Relations de commutation de l'impulsion totale \mathbf{P} avec H_P , H_R , H_I	235
4. Distribution de Bose - Einstein	236
5. Densités de quasi-probabilité et fonctions caractéristiques	238
6. Composantes en quadrature d'un champ monomode. Représentation graphique de l'état du champ	243
7. Etats comprimés du rayonnement	248
8. Génération d'états comprimés du rayonnement dans une interaction à deux photons	250
9. Densité de quasi-probabilité d'un état comprimé	252

**IV
AUTRES FORMULATIONS ÉQUIVALENTES
DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE**

<i>Introduction</i>	255
A. Comment obtenir d'autres formulations équivalentes de l'électrodynamique	257
1. Changement de jauge et changement de lagrangien	257
2. Changement de lagrangien et transformation unitaire associée - <i>a. Changement de lagrangien. b. Les deux descriptions quantiques. c. Correspondance entre les deux descriptions quantiques. d. Application au champ électromagnétique</i>	258
3. Transformation unitaire générale. L'équivalence entre les différentes formulations de l'électrodynamique quantique	264

B. Quelques exemples simples pour des charges couplées à un champ extérieur	268
1. Lagrangien et hamiltonien du système	268
2. Changement de jauge simple ; invariance de jauge - <i>a. Le nouveau point de vue. b. Transformation unitaire reliant les deux points de vue - Invariance de jauge</i>	269
3. La transformation de Göppert-Mayer - <i>a. L'approximation des grandes longueurs d'onde. b. Changement de jauge faisant apparaître l'interaction dipolaire électrique. c. Avantages du nouveau point de vue. d. Equivalence entre les hamiltoniens d'interaction $A.p$ et $E.r$. e. Généralisation</i>	271
4. Une transformation ne se ramenant pas à un changement de lagrangien : la transformation de Henneberger - <i>a. Motivation. b. Détermination de la transformation unitaire - Transformés des divers opérateurs. c. Discussion physique. d. Généralisation à un champ quantique : la transformation de Pauli-Fierz-Kramers</i>	277
C. La transformation de Power-Zienau-Woolley : forme multipolaire de l'interaction entre charges et champ	282
1. Description des sources par une densité de polarisation et de magnétisation - <i>a. Densité de polarisation associée à un système de charges. b. L'induction électrique. c. Courant de polarisation et courant de magnétisation</i>	283
2. Changement de lagrangien - <i>a. La transformation de Power-Zienau-Woolley. b. Le nouveau lagrangien. c. Développement multipolaire de l'interaction entre les particules chargées et le champ</i>	288
3. Nouveaux moments conjugués et nouvel hamiltonien - <i>a. Expression de ces grandeurs. b. Signification physique des nouveaux moments conjugués. c. Structure du nouvel hamiltonien</i>	291
4. L'électrodynamique quantique dans le nouveau point de vue - <i>a. Quantification. b. Expression de quelques grandeurs physiques</i> ...	295
5. Equivalence entre les deux points de vue - Quelques écueils à éviter ..	298
D. Forme simplifiée de l'équivalence pour les matrices S de diffusion	300
1. Introduction de la matrice S	300
2. Matrice S dans un autre point de vue - Etude de l'équivalence	302
3. Commentaires sur l'utilisation de l'équivalence entre les matrices S ..	304

COMPLÉMENT A_{IV} — INTRODUCTION ÉLÉMENTAIRE DE L'HAMILTONIEN DIPOLAIRE ÉLECTRIQUE

<i>Introduction</i>	306
1. Hamiltonien dipolaire électrique pour un système localisé de charges couplées à un champ extérieur - <i>a. Transformation unitaire suggérée par</i>	

<i>l'approximation des grandes longueurs d'onde. b. Hamiltonien transformé. c. L'opérateur vitesse dans le nouveau point de vue</i>	306
2. Hamiltonien dipolaire électrique pour un système localisé de charges couplées au rayonnement quantique - <i>a. Etude de la transformation unitaire. b. Transformation des grandeurs physiques. c. Densité de polarisation et induction électrique. d. Expression de l'hamiltonien dans le nouveau point de vue</i>	309
3. Quelques prolongements - <i>a. Cas de deux systèmes séparés de charges. b. Cas d'un champ quantique couplé à des sources classiques</i>	314

**COMPLÉMENT B_{IV} — PROCESSUS À UN OU DEUX PHOTONS :
ÉQUIVALENCE ENTRE LES HAMILTONIENS D'INTERACTION
EN $\mathbf{A.p}$ ET $\mathbf{E.r}$**

<i>Introduction</i>	318
1. Notations - Principe du calcul	318
2. Calcul des amplitudes de transition dans les deux points de vue - <i>a. Hamiltonien d'interaction en $\mathbf{A.p}$. b. Hamiltonien d'interaction en $\mathbf{E.r}$. c. Vérification directe de l'identité entre les deux amplitudes</i>	319
3. Généralisations - <i>a. Extension à d'autres processus. b. Processus non résonnants</i>	327

**COMPLÉMENT C_{IV} — INTERACTION ENTRE DEUX SYSTÈMES
LOCALISÉS DE CHARGES DANS LE POINT DE VUE DE
POWER-ZIENAU-WOOLLEY**

<i>Introduction</i>	330
1. Notations	330
2. Expression de l'hamiltonien	331

**COMPLÉMENT D_{IV} — TRANSFORMATION DE
POWER-ZIENAU-WOOLLEY ET JAUGE DE POINCARÉ**

<i>Introduction</i>	333
1. La transformation de Power-Zienau-Woolley considérée comme un changement de jauge	333
2. Propriétés du potentiel vecteur dans la nouvelle jauge	334
3. Les potentiels dans la jauge de Poincaré	335

COMPLÉMENT E_{IV} — EXERCICES

1. Exemple d'effet produit par un branchement soudain du potentiel vecteur	338
2. Excitation à deux photons de l'atome d'hydrogène : calculs approchés faits à partir des hamiltoniens en $\mathbf{A}\cdot\mathbf{p}$ et $\mathbf{E}\cdot\mathbf{r}$	340
3. Hamiltonien dipolaire électrique pour un ion couplé à un champ extérieur	344
4. Diffusion d'une particule par un potentiel en présence d'un rayonnement laser	346
5. Equivalence entre les hamiltoniens d'interaction en $\mathbf{A}\cdot\mathbf{p}$ et $\mathbf{Z}\cdot(\nabla V)$ pour le calcul des amplitudes de transition	351
6. Réponse linéaire et susceptibilité ; application au calcul du rayonnement d'un dipôle	354
7. Diffusion non résonnante : vérification directe de l'égalité des amplitudes de transition calculées dans les points de vue $\mathbf{A}\cdot\mathbf{p}$ et $\mathbf{E}\cdot\mathbf{r}$	358

V

INTRODUCTION A LA FORMULATION COVARIANTE DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE

<i>Introduction</i>	363
A. Electrodynamique classique en jauge de Lorentz	366
1. Formalisme lagrangien - <i>a. Notations covariantes - Notations ordinaires. b. Choix d'un nouveau lagrangien pour le champ. c. Equations de Lagrange du champ. d. Condition supplémentaire. e. Densité de lagrangien dans l'espace réciproque</i>	366
2. Formalisme hamiltonien - <i>a. Moments conjugués des potentiels. b. Hamiltonien du champ. c. Equations de Hamilton-Jacobi du champ libre</i>	371
3. Variables normales du champ classique - <i>a. Définition. b. Développement des potentiels en variables normales. c. Forme de la condition supplémentaire pour le champ classique libre - Arbitraire de jauge. d. Expression de l'hamiltonien du champ</i>	373
B. Difficultés posées par la quantification du champ libre	382
1. Quantification canonique - <i>a. Relations de commutation canoniques. b. Opérateurs d'annihilation et de création. c. Relations de commutation covariantes entre les potentiels libres dans le point de vue de Heisenberg</i>	382

2. Problèmes d'interprétation physique posés par la quantification covariante - <i>a. Forme de la condition supplémentaire en théorie quantique. b. Problèmes posés par la construction de l'espace des états</i>	385
C. Quantification covariante avec une métrique indéfinie	389
1. Métrique indéfinie dans un espace de Hilbert	389
2. Choix de la nouvelle métrique pour la quantification covariante	393
3. Construction des kets physiques	395
4. Valeurs moyennes des grandeurs physiques dans un ket physique - <i>a. Valeur moyenne des potentiels et des champs. b. Arbitraire de jauge et arbitraire sur les kets physiques associés à un état physique. c. Valeur moyenne de l'hamiltonien</i>	398
D. Exemple simple d'interaction : champ quantique couplé à deux charges extérieures fixes	402
1. Hamiltonien du problème	402
2. Déplacement de l'état fondamental du champ - Réinterprétation de la loi de Coulomb. - <i>a. Calcul perturbatif du déplacement. b. Discussion physique - Echange de photons scalaires entre les deux charges. c. Calcul exact</i>	403
3. Quelques propriétés du nouvel état fondamental du champ - <i>a. Condition supplémentaire en présence d'interaction - Caractère physique du nouvel état fondamental. b. Valeur moyenne du potentiel scalaire dans le nouvel état fondamental du champ</i>	407
4. Conclusion et généralisation	409

**COMPLÉMENT A_V — INTRODUCTION ÉLÉMENTAIRE
À LA THÉORIE DU CHAMP ÉLECTRON-POSITRON,
COUPLÉ AU CHAMP DE PHOTONS EN JAUGE DE LORENTZ**

<i>Introduction</i>	410
1. Brefs rappels sur l'équation de Dirac - <i>a. Matrices de Dirac. b. Hamiltonien de Dirac ; densités de charge et de courant. c. Lien avec les notations covariantes. d. Spectre d'énergie de la particule libre. e. Etats d'énergie négative - Théorie des trous</i>	410
2. Quantification du champ de Dirac libre - <i>a. Procédure de seconde quantification. b. Hamiltonien du champ quantifié - Niveaux d'énergie. c. Translations temporelles et spatiales</i>	416
3. Champ de Dirac et champ électromagnétique en interaction - <i>a. Hamiltonien du système total - Hamiltonien d'interaction. b. Equations de Heisenberg des champs. c. Forme de la condition supplémentaire en présence d'interaction</i>	420

**COMPLÉMENT B_V — JUSTIFICATION DE LA THÉORIE
NON RELATIVISTE EN JAUGE DE COULOMB À PARTIR DE
L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE RELATIVISTE**

<i>Introduction</i>	426
1. Passage de la jauge de Lorentz à la jauge de Coulomb en électrodynamique quantique relativiste - <i>a. Transformation sur les photons scalaires faisant apparaître l'interaction de Coulomb. b. Effet de la transformation sur les autres termes de l'hamiltonien en jauge de Lorentz. c. Condition supplémentaire - Absence d'effets physiques des photons scalaires et longitudinaux. d. Conclusion : hamiltonien de l'électrodynamique quantique relativiste en jauge de Coulomb</i>	427
2. Limite non relativiste en jauge de Coulomb : justification de l'hamiltonien de Pauli pour les particules - <i>a. Terme prépondérant H_0 de l'hamiltonien à la limite non relativiste : énergie de masse des particules. b. Hamiltonien effectif dans une multiplicité. c. Discussion physique</i>	434

COMPLÉMENT C_V — EXERCICES

1. Autres lagrangiens covariants du champ électromagnétique	443
2. Opérateurs d'annihilation et de création de photons scalaires : peut-on échanger leur signification ?	445
3. Quelques propriétés relatives à la métrique indéfinie	447
4. Opérateur de translation pour les opérateurs de création et d'annihilation d'un photon scalaire	448
5. Lagrangien du champ de Dirac. Lien entre phase du champ de Dirac et jauge du champ électromagnétique	451
6. Lagrangien et hamiltonien des champs de Dirac et Maxwell couplés	453
7. Opérateurs champ de Dirac et densité de charge. Etude de quelques relations de commutation	456
<i>Liste des ouvrages cités en référence</i>	459
<i>Index</i>	461

Avant-propos

Le développement spectaculaire de nouvelles sources de rayonnement électromagnétique, couvrant un domaine de fréquences allant des ondes radio à l'ultra-violet lointain (lasers, masers, rayonnement synchrotron, sources millimétriques), a renouvelé considérablement l'intérêt porté aux processus d'interaction entre photons et atomes. De nouvelles méthodes sont apparues permettant d'obtenir des informations de plus en plus précises sur la structure et la dynamique des atomes et des molécules, de contrôler leurs degrés de liberté internes et externes ou de générer de nouveaux types de rayonnements. Ces développements font qu'un nombre croissant de physiciens et de chimistes, de chercheurs et d'ingénieurs, s'intéressent aux processus d'interaction entre matière et rayonnement à basse énergie. L'ambition de cet ouvrage est de mettre à leur disposition les bases théoriques nécessaires pour aborder l'étude de ces processus en partant d'un niveau en mécanique quantique et en électromagnétisme classique correspondant à celui de la maîtrise.

Un tel programme comporte naturellement deux volets. Il faut, d'une part, présenter le cadre théorique permettant de décrire la dynamique quantique du système global champ électromagnétique + particules chargées non relativistes, discuter le contenu physique de la théorie et les diverses formulations que l'on peut en donner. Tel est l'objet du présent volume intitulé « Photons et atomes — Introduction à l'électrodynamique quantique ». Il faut, d'autre part, décrire les processus d'interaction entre matière et rayonnement (émission, absorption, diffusion de photons par des atomes...) et présenter les méthodes théoriques qui permettent de les analyser (méthodes perturbatives, resommations partielles de la série des perturbations, équation pilote, équations de Bloch optiques, méthode de l'atome habillé...). Ces questions sont abordées dans un autre volume intitulé « Photons et atomes — Les processus d'interaction ». Les objectifs de ces deux volumes sont donc clairement distincts et, suivant ses préoccupations ou ses besoins, le lecteur pourra utiliser l'un, l'autre ou les deux volumes de cet ouvrage.

L'exposé des thèmes étudiés montre clairement que cet ouvrage ne se situe pas sur le même plan que d'autres livres consacrés à l'électrodynamique quantique. En effet, la plupart de ceux-ci s'adressent à un public de physiciens de la théorie des champs pour lesquels les notions de covariance manifeste, d'invariance relativiste, de champ de matière, de renor-

malisation... sont fondamentales. Par ailleurs, les livres traitant de problèmes d'optique quantique, et en particulier d'optique des lasers, sont très succincts sur les bases de l'électrodynamique et, notamment, sur les problèmes posés par la quantification du rayonnement. Il y a entre ces deux voies extrêmes, une approche intermédiaire que nous avons choisie ici, car elle répond, nous semble-t-il, à un besoin important et actuel.

Remerciements

Cet ouvrage s'appuie sur un travail d'enseignement et de recherche qui s'est poursuivi pendant plusieurs années au Collège de France et au Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure. Nous tenons ici à exprimer tous nos remerciements à nos collègues et amis qui ont directement participé à ces recherches ou qui nous ont fait bénéficier de leurs réflexions.

Nous sommes particulièrement reconnaissants à Jean Dalibard qui nous a beaucoup aidés pour la conception et la mise au point des exercices, et à Mesdames et Mesdemoiselles Marthouret, Guillaume, Brodschi et Audoin pour la frappe et le tirage du manuscrit.

- complexes 89,92
 - changement de (dans le lagrangien) 86
 - changement de (dans l'hamiltonien) 88, 262
 - canoniquement conjuguées 35, 88, 95, 259, 260, 371
 - redondantes 111, 115, 156e, 159e, 364
- Variables normales du rayonnement
- définition et expression 25, 27, 31, 373
 - discrétisation 33
 - équations d'évolution 26, 28, 34, 68e, 221, 373, 374
 - analogie avec une fonction d'onde 32
 - transverses 27, 31, 376
 - quantification 35, 173
 - longitudinales et scalaires 374, 376, 381
 - variables α_d et α_g 377, 378, 380
 - condition supplémentaire de Lorentz 376
- (voir aussi développements en variables normales)

- Vide 188, 191, 254e, 387, 388, 396
(voir aussi fluctuations du vide)
- Vitesses généralisées
(transformation des) 87
- Vitesse des particules
- en jauge de Coulomb 119, 179.
 - dans le point de vue de Göppert-Mayer 273, 308
 - dans le point de vue de Henneberger 279
 - dans le point de vue de Power-Zienau-Woolley 292, 297

W

- Woolley (voir transformation de Power-Zienau-Woolley)

Z

- Zienau (voir transformation de Power-Zienau-Woolley)

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.