

Physique atomique et moléculaire

M. Claude COHEN-TANNOUJJI, professeur

Le cours de cette année a été consacré à une discussion des mécanismes physiques responsables des corrections radiatives stimulées et spontanées de l'électrodynamique quantique. Il a permis de regrouper et de présenter un certain nombre de résultats obtenus au laboratoire en collaboration avec J. Dupont-Roc, C. Fabre, P. Avan, S. Reynaud, J. Dalibard. La motivation de ces travaux n'est pas de présenter de nouveaux calculs des corrections radiatives. L'efficacité de l'électrodynamique quantique dans ce domaine est largement établie. Le but est plutôt d'essayer de comprendre l'origine physique des phénomènes, de justifier certaines images physiques et d'en établir les limites, d'explicitier les contributions respectives des divers mécanismes entrant en jeu.

Deux corrections radiatives jouent un rôle particulièrement important en physique atomique : le déplacement radiatif des niveaux d'énergie d'un atome (déplacement de Lamb), et la correction au magnétisme de spin de l'électron (anomalie $g-2$).

Une image physique particulièrement séduisante pour comprendre le déplacement de Lamb a été proposée il y a plusieurs années par Welton. Elle consiste à considérer l'électron vibrant sous l'effet des fluctuations quantiques du vide de rayonnement et moyennant de ce fait le potentiel coulombien du noyau dans une petite région correspondant à l'étendue du mouvement de vibration. Ce moyennage est responsable d'une modification de l'énergie potentielle de l'électron qui se traduit par un déplacement des niveaux d'énergie atomiques (le problème de la modification de l'énergie cinétique sera envisagé plus loin). On comprend ainsi pourquoi deux niveaux, qui auraient la même énergie dans un potentiel coulombien pur, comme les états $2s_{1/2}$ et $2p_{1/2}$ de l'hydrogène, se retrouvent séparés par un écart énergétique (déplacement de Lamb) dont l'ordre de grandeur peut être correctement estimé à partir d'une telle approche.

L'image de Welton se heurte cependant à une difficulté sérieuse quand on essaie de l'appliquer à l'anomalie $g-2$. Elle ne donne pas le bon signe ! La vibration du spin de l'électron dans les fluctuations du vide ne peut que

diminuer le moment magnétique de spin de l'électron alors qu'on observe une augmentation. Quelle est alors l'origine physique du signe positif de $g-2$? Plusieurs suggestions ont été avancées : des couplages relativistes entre la vibration de la charge de l'électron et celle de son spin ; des effets à plusieurs particules (création virtuelle de paires électron positron) dont un traitement aussi simpliste que celui de Welton ne pourrait rendre compte...

La méthode utilisée pour aborder ces divers problèmes est celle de l'hamiltonien effectif dont l'idée générale est la suivante. Considérons un électron faiblement lié dans un champ statique, électrique ou magnétique, et interagissant avec un mode du champ de rayonnement de fréquence ω suffisamment élevée (l'énergie $\hbar\omega$ des photons de ce mode est supposée grande devant l'énergie de liaison E_L de l'électron). Les niveaux d'énergie du système global « électron plus photons » se groupent en multiplicités \mathcal{E}_N correspondant à un nombre bien défini N de photons, et bien séparées les unes des autres puisque $\hbar\omega \gg E_L$. L'interaction entre l'électron et le rayonnement couple entre elles ces diverses multiplicités et peut être décrite en termes de processus élémentaires d'émission ou d'absorption de photons par l'électron. Les manifestations de ce couplage sont de deux types : les variables électroniques, initialement « lentes », acquièrent une composante rapide aux fréquences $\omega, 2\omega, \dots$ correspondant au mouvement de vibration de l'électron dans le champ de rayonnement ; d'autre part, les fréquences du mouvement lent de l'électron dans les champs statiques sont modifiées, ce qui correspond à une modification du mouvement lent de l'électron induite par le mouvement rapide précédent. La méthode de l'hamiltonien effectif consiste à effectuer sur l'hamiltonien du système global une transformation unitaire qui supprime, à un ordre donné de perturbation, les couplages non diagonaux entre multiplicités correspondant à des nombres différents de photons. Le nouvel hamiltonien ainsi obtenu, appelé « hamiltonien effectif », est un hamiltonien purement électronique, c'est-à-dire n'agissant que sur les degrés de liberté lents, et incorporant les effets du couplage électron-photons, c'est-à-dire les effets du couplage avec les degrés de liberté rapides.

Le cours a donc commencé par une étude détaillée de la méthode de l'hamiltonien effectif. Cette méthode est en fait très générale et peut être appliquée toutes les fois que deux types de degrés de liberté de fréquences propres différentes interviennent dans un système physique. Plusieurs illustrations de la méthode ont été ainsi présentées, dont l'établissement de l'interaction effective entre électrons d'un métal par échange de phonons (interaction qui joue un rôle fondamental en supraconductivité) ; l'établissement de l'interaction effective de Ruderman-Kittel entre spins nucléaires dans un métal via les électrons de conduction...

Le problème des corrections radiatives a été ensuite abordé en commençant par le cas le plus simple d'une particule sans spin. Dans la multiplicité \mathcal{E}_N

à N photons, l'hamiltonien effectif \mathcal{H}_{eff} a, au second ordre de perturbation, la forme suivante :

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = N(R + S) + R$$

où R et S sont deux opérateurs purement électroniques. Le terme $N(R + S)$ représente des corrections proportionnelles à l'intensité du rayonnement présent dans le mode ω . On les appelle pour cette raison « corrections radiatives stimulées ». Elles décrivent par exemple comment les propriétés dynamiques de la particule sont modifiées sous l'effet d'une irradiation laser. On montre en détail que tous les termes de l'hamiltonien $N(R + S)$ peuvent être interprétés semi-classiquement en considérant le mouvement de vibration de la particule chargée dans l'onde incidente : alourdissement de la particule associé à son énergie cinétique de vibration, moyennage des champs statiques sur l'étendue du mouvement de vibration...

Le terme R , indépendant du nombre N de photons, subsiste dans le vide de rayonnement ($N = 0$). Il décrit la contribution du mode ω aux « corrections radiatives spontanées » (au second ordre de perturbation, les effets des divers modes s'ajoutent indépendamment). On peut écrire ce terme sous la forme :

$$R = \frac{1}{2}(R + S) + \frac{1}{2}(R - S)$$

Le premier terme, $\frac{1}{2}(R + S)$, a la même forme que $N(R + S)$ au remplacement près de N par $\frac{1}{2}$. On peut donc considérer qu'il décrit des corrections radiatives « stimulées par les fluctuations du vide » du mode (l'énergie associée à ces fluctuations est précisément $\frac{1}{2} \hbar \omega$). Quant à l'autre terme, $\frac{1}{2}(R - S)$, on montre, par comparaison avec les résultats obtenus au cours de l'année antérieure, qu'il représente l'effet en retour sur la particule du champ qu'elle rayonne dans le mode ω , c'est-à-dire encore l'effet de la réaction de rayonnement.

La méthode de l'hamiltonien effectif permet donc de séparer clairement pour les corrections radiatives spontanées l'effet des fluctuations du vide de celui de la réaction de rayonnement. Une première application des résultats précédents concerne le déplacement de Lamb. A partir de l'expression de R et S , on montre que la moyenne angulaire du terme $\frac{1}{2}(R - S)$ apparaît sous la forme d'une correction d'énergie cinétique associée à une correction de masse δm de la particule, alors que la moyenne angulaire du terme $\frac{1}{2}(R + S)$ introduit une correction d'énergie potentielle qui correspond exactement au calcul simple de Welton. Comme une correction de masse ne peut lever la **dégénérescence** entre les états $2s_{1/2}$ et $2p_{1/2}$ de l'hydrogène, on en déduit que le déplacement de Lamb est entièrement dû aux fluctuations du vide et qu'il est donc correctement décrit par l'image de Welton.

Pour étudier l'anomalie $g-2$, il faut bien sûr tenir compte du spin de l'électron, et partir d'un hamiltonien suffisamment précis, c'est-à-dire tenant

compte des premières corrections relativistes. Là encore, la méthode de l'hamiltonien effectif se révèle fort utile. On montre comment, en partant de l'hamiltonien de Dirac en seconde quantification, on peut en déduire un hamiltonien effectif agissant sur les états à un seul électron et incluant, d'une

part des corrections relativistes (à l'ordre $\frac{1}{c^2}$ inclus), d'autre part des effets

à plusieurs particules (créations virtuelles de paires électron-positron). Les différents termes de cet hamiltonien effectif sont calculés et interprétés physiquement.

Il est alors possible de reprendre le calcul des termes $\frac{1}{2}(R + S)$ et $\frac{1}{2}(R - S)$ introduits plus haut en y incluant les effets liés au spin et aux corrections relativistes. En étudiant ensuite comment ces termes modifient les niveaux d'énergie d'un électron dans un champ magnétique statique uniforme B_0 , on peut espérer comprendre l'origine physique de l'anomalie g-2.

Rappelons tout d'abord quelles sont les fréquences caractéristiques du mouvement de l'électron en l'absence de corrections radiatives. Ce sont, d'une

part la « fréquence cyclotron », $\omega_c = \frac{e B_0}{m}$ (où e et m sont la charge et la

masse de l'électron), caractérisant le mouvement circulaire de la charge électronique dans le champ B_0 ; d'autre part, la « fréquence de Larmor »,

$\omega_L = -g \frac{e B_0}{2m}$, faisant intervenir le « facteur g » de l'électron, et caractérisant le mouvement de précession du moment magnétique de spin dans le champ B_0 . En l'absence de corrections radiatives, $g = 2$, et par suite $\omega_c = \omega_L$. Le problème est donc de comprendre comment les corrections radiatives modifient ω_c et ω_L .

A l'ordre zéro en $\frac{1}{c}$, la modification ne porte que sur ω_c et provient du

terme $\frac{1}{2}(R - S)$. Ce résultat apparaît mathématiquement sous forme d'une

correction à l'énergie cinétique, déjà mentionnée plus haut, et liée à une augmentation de masse δm . L'interprétation physique est très simple : la réaction de rayonnement ralentit le mouvement cyclotron de la charge car cette dernière est alourdie par son propre champ. Notons qu'il n'apparaît pas de correction analogue pour la fréquence de Larmor. L'origine de cette

différence importante est, qu'à la limite faiblement relativiste, un moment magnétique est beaucoup moins couplé à son propre champ qu'une charge.

Les modifications à la fréquence de Larmor ω_L , n'apparaissent en fait

qu'à l'ordre deux en $\frac{1}{c}$ et proviennent toutes du terme $\frac{1}{2}(R + S)$. Elles

correspondent à une réduction de ω_L liée aux mouvements de vibration de la charge et du spin dans les fluctuations du vide. Le calcul confirme donc bien que l'effet des fluctuations du vide est de réduire le moment magnétique de spin. Tous les termes obtenus peuvent être interprétés semi-classiquement.

La conclusion essentielle de ce qui précède est donc que l'effet essentiel

des corrections radiatives (à l'ordre zéro en $\frac{1}{c}$) se traduit par un ralentissement

du mouvement cyclotron de la charge. Ce ralentissement peut être décrit par une augmentation δm de la masse qui apparaît dans ω_c et non dans ω_L :

$$\omega_c \rightarrow \bar{\omega}_c = \frac{e B_0}{2(m + \delta m)} \qquad \omega_L \rightarrow \bar{\omega}_L = \omega_L = \frac{e B_0}{2m}$$

L'énergie cinétique corrigée de la particule s'exprime en fonction de $m_R = m + \delta m$ qui apparaît ainsi comme la masse « expérimentale » ou « renormalisée » de l'électron. Si l'on réexprime $\bar{\omega}_L$ en fonction de m_R , on voit alors que l'on peut écrire :

$$\bar{\omega}_L = \frac{e B_0}{2m} = \frac{g}{2} \frac{e B_0}{2m_R} \quad \text{avec} \quad g = 2 \frac{m_R}{m} > 2$$

Si $g-2$ apparaît positif c'est donc finalement parce que la fréquence cyclotron est plus réduite que la fréquence de Larmor. L'origine physique de $g-2$ est liée à la renormalisation de la masse, elle-même due à la réaction de rayonnement. L'effet des fluctuations du vide est négligeable à la limite faiblement relativiste. Le cours se termine par une discussion de l'effet des modes relativistes ($\hbar\omega \gtrsim mc^2$), montrant qu'ils ne modifient pas l'essentiel des conclusions précédentes.

C. C.-T.

SÉMINAIRES 1980-1981

Les séminaires donnés au Collège de France ont été consacrés à la présentation et à la discussion d'un certain nombre de développements récents en physique atomique et moléculaire.

Dix séminaires ont été organisés :

J.M. BUZZI (Laboratoire de physique des milieux ionisés, Ecole Polytechnique), *Emission cohérente d'ondes centimétriques et millimétriques à l'aide d'un faisceau d'électrons relativistes.*

M^{lle} A. CRUBELIER (Laboratoire Aimé Cotton, Orsay), *Superradiance et subradiance.*

C. DELALANDE (Laboratoire d'optique quantique, Ecole Polytechnique), *Transferts d'énergie vibrationnelle dans les liquides simples.*

Y. FARGE (Laboratoire Lure, Orsay), *Laser à électrons libres : perspectives expérimentales.*

J.C. GAY (Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'E.N.S., Paris), *Approche expérimentale du spectre de Landau du Cesium atomique.*

E. GIACOBINO (Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'E.N.S., Paris), *Spectroscopie à très haute résolution dans ³He et ⁴He.*

W. Mc GILLIVRAY (Griffith University, Brisbane et Max-Planck Gesellschaft, Garching), *Transients in laser-atom interaction.*

P.M. KOCH (Yale University et Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'E.N.S.), *Fast beam studies of highly excited hydrogen atoms in an intense static or microwave electric field.*

F.M. PIPKIN (Harvard University et C.E.R.N.), *Fast beam measurements of the fine structure of hydrogenic atoms.*

J. VIGUE (Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'E.N.S., Paris), *Relaxation vibrationnelle et photochimie.*

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUJDI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure. Il y dirige les

travaux d'une petite équipe de chercheurs et participe, sur le plan théorique, à quelques-uns des autres projets en cours au Laboratoire.

Ce laboratoire, qui est associé au C.N.R.S., est implanté géographiquement, d'une part au Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure (24, rue Lhomond), d'autre part à l'Université Paris VI (quai Saint-Bernard). Il est dirigé par M. Jean BROSSEL, Professeur à l'Université Paris VI, membre de l'Institut.

Le personnel du Laboratoire comporte onze enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, maîtres-assistants, agrégés-préparateurs), vingt-trois chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, maîtres, chargés et attachés de recherche), quatre chercheurs étrangers, quatre élèves de grandes écoles, quatre boursiers D.G.R.S.T. effectuant des stages ou des thèses de 3^e cycle, vingt-cinq techniciens et administratifs.

Le laboratoire est constitué d'une dizaine d'équipes de recherches, comprenant trois à sept chercheurs, et étudiant divers problèmes de physique atomique et moléculaire centrés autour des deux thèmes généraux suivants :

— développement des méthodes optiques de la physique atomique et moléculaire ;

— diffusion de la lumière laser par un fluide.

Un rapport d'activité scientifique est rédigé tous les ans pour le Comité National du C.N.R.S. Il contient une analyse détaillée des problèmes scientifiques abordés par chaque équipe et un bilan des résultats nouveaux obtenus. Nous nous contenterons donc ici de donner la liste des publications du Laboratoire en 1980, ainsi que celles des thèses (de 3^e cycle et d'Etat) soutenues au cours de cette même année.

PUBLICATIONS DU LABORATOIRE EN 1980

J. BRETON, P.M. GUYON and M. GLASS-MAUJEAN, *Radiative emission from sigulet superexcited levels of H_2* (*Phys. Rev. A*, 21, 1909, 1980).

R. BACIS, M. BROYER, S. CHURASSY, J. VERGES, J. VIGUE, *eQq measurements in the X, 1g, O⁺g and B states of I_2 : a test of the electronic molecular eigenfunctions* (*J. Chem. Phys.*, 73, 2641, 1980).

P. GOY, C. FABRE, M. GROSS and S. HAROCHE, *High-resolution two-photon millimetre spectroscopy in sodium Rydberg states : possible applications to metrology* (*J. Phys. B*, 13, L-83, 1980).

C. FABRE, S. HAROCHE and P. GOY, *Addendum to « Millimeter spectroscopy in sodium Rydberg states »* (*Phys. Rev. A*, 22, 778, 1980).

L. MOI, C. FABRE, P. GOY, M. GROSS, S. HAROCHE, P. ENCRENAZ, G. BEAUDIN, B. LAZAREFF, *Heterodyne detection of Rydberg atom maser emission* (*Optics Comm.*, 33, 47, 1980).

N.W. CARLSON, D.J. JACKSON, A.L. SCHAWLOW, M. GROSS and S. HAROCHE (*Optics Comm.*, 32, 350, 1980).

M.A. BOUCHIAT, L. POTTIER and G. TRENEC, *A cesium cell with laser beam multipass* (*Rev. Phys. Appl.*, 15, 785, 1980).

M.A. BOUCHIAT, A. CLOUQUEUR et L. POTTIER, *Une recette simple pour accroître aux basses fréquences l'efficacité d'un asservissement linéaire* (*Rev. Phys. Appl.*, 15, 1275, 1980).

M.A. BOUCHIAT, J. GUÉNA and L. POTTIER, *Can a stray static electric field mimic parity violation in Stark experiments on forbidden M_1 transitions?* (*J. de Phys. Lettres*, 41, L-299, 1980).

M. PINARD and F. LALOË, *The role of the Pauli principle in spin exchange collisions* (*J. de Phys.*, 41, 769, 1980).

M. PINARD and F. LALOË, *The role of the Pauli principle in metastability exchange collisions* (*J. de Phys.*, 41, 799, 1980).

M. LEDUC, G. TRENEC and F. LALOË, *Nuclear polarization of a ^3He gas by laser optical pumping* (*J. de Phys.*, C7, 41, 75, 1980).

L. JULIEN, M. PINARD and F. LALOË, *Hyperfine structure and isotope shift of the 640.2 and 626.6 nm lines of neon* (*J. de Phys. Lettres*, 41, L-479, 1980).

D. LEVESQUE and C. LHUILLIER, *Ground state of polarized and unpolarized ^3He* (*J. de Phys.*, C7, 41, 191, 1980).

C. LHUILLIER and F. LALOË, *Quantum properties of spin polarized ^3He ($^3\text{He}\uparrow$)* (*J. de Phys.*, C7, 41, 51, 1980).

D. VIENNE-CASALTA, J. MARGERIE and J.C. GAY, *Rare gas collisional perturbation of the 6^3D_1 , 6^1D_2 levels of mercury : a theoretical estimate* (*J. de Phys.*, 41, 503, 1980).

G. GRYNBERG, M. DEVAUD, C. FLYTZANIS and B. CAGNAC, *Doppler-free two-photon dispersion* (*J. de Phys.*, 41, 931, 1980).

E. GIACOBINO, M. DEVAUD, F. BIRABEN and G. GRYNBERG, *Doppler-free two-photon dispersion and optical bistability in rubidium vapor* (*Phys. Rev. Lett.*, 45, 434, 1980).

G. GRYNBERG, F. BIRABEN and B. CAGNAC, *Multiphoton resonant processes in atoms* (dans *Advances in Coherent Non-Linear Optics*, Springer Verlag, 1980).

E. GIACOBINO and B. CAGNAC, *Doppler-free multiphoton spectroscopy* (dans *Progress in Optics XVII*, North Holland, 1980).

J.C. GAY, *Aspects of Landau condensation in atomic physics* (*Comments Atom. Mol. Phys.*, 9, 97, 1980).

J.C. GAY, D. DELANDE and F. BIRABEN, *Landau condensation of the quasi-hydrogenic spectrum of cesium* (*J. Phys. B, At. Mol. Phys.*, 13, L-729, 1980).

J.C. GAY, *Magnetic fields atomic physics* (article de revue pour *Progress in Atomic Spectroscopy*, Vol. III, Plenum Press).

M.A. BOUCHIAT, L. POTTIER, *Search for parity violation in M_1 forbidden transitions* (Proceedings of the Workshop on Neutral Current Interactions in Atoms, W. Williams editor, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., p. 122, 1980).

A. ASPECT, G. ROGER, S. REYNAUD, J. DALIBARD and C. COHEN-TANNOUJJI, *Time correlations between the two sidebands of the resonance fluorescence triplet* (*Phys. Rev. Letters*, 45, 617, 1980).

C. COHEN-TANNOUJJI, Participation à la rédaction du Livre Blanc sur la Recherche. Rédaction du chapitre sectoriel sur la Physique (La Documentation Française, septembre 1980).

P. LALLEMAND et C. ALLAIN, *Excitations thermiques propagatives dans une couche de fluide stratifiée* (*J. de Phys.*, 41, 1, 1980).

C. ALLAIN, M. BERARD and P. LALLEMAND, *Thermal diffusivity of glycerol at the liquid-glass transition* (*Mol. Phys.*, 41, 429, 1980).

C. ALLAIN et P. LALLEMAND, *Study of forced Rayleigh light scattering by a fluid mixture with chemical reaction* (*J. de Chim. Phys.*, 77, 881, 1980).

A.M. CAZABAT, D. LANGEVIN and A. POUCHELON, *Light-scattering study of water-oil microemulsions* (*J. of Coll. and Int. Sci.*, 73, 1, 1980).

A. POUCHELON, J. MEUNIER, D. LANGEVIN and A.M. CAZABAT, *Light scattering from oil-water interfaces : measurement of low interfacial tensions* (*J. de Phys. Lettres*, 41, L-239, 1980).

D. LANGEVIN and C. GRIESMAR, *Light-scattering study of fatty acid monolayers* (*J. Phys. D : Appl. Phys.*, 13, 1189, 1980).

A.M. CAZABAT, D. CHATENAY, D. LANGEVIN and A. POUCHELON, *Light scattering study of microemulsions and its relation to percolation phenomena* (*J. de Phys. Lettres*, 41, L-445, 1980).

A. POUCHELON, J. MEUNIER, D. LANGEVIN, D. CHATENAY, A.M. CAZABAT, *Low interfacial tensions in three phases systems obtained with oil-water surfactant mixtures* (*Chem. Phys. Lett.*, 76, 277, 1980).

A.M. CAZABAT, D. LANGEVIN, *Light scattering by water in oil micro-emulsions* (in *Light Scattering in Liquids and Macromolecular Solutions*, Plenum press, p. 139, 1980).

F. BIRABEN, E. DE CLERCQ, E. GIACOBINO and G. GRYNBERG, *Hyperfine structure in helium-3* (*J. Phys. B., At. Mol.*, 13, L-685, 1980).

THÈSES

3^e cycle

Emeric de CLERCQ, *Etude par spectroscopie à deux photons de structures fines et hyperfines et de déplacements isotopiques dans l'hélium.*

Andréa COBELNTZ, *Analyse théorique et expérimentale de certaines causes d'erreurs systématiques dans l'expérience de la violation de la parité sur le césium.*

Martin DEVAUD, *Bistabilité optique et dispersion à deux photons.*

Marc HIMBERT, *Etude théorique et expérimentale de résonances nouvelles en spectroscopie laser de systèmes à trois niveaux en phase vapeur.*
Etat

Claude FABRE, *Etude théorique et expérimentale de l'interaction d'un atome très excité avec le rayonnement. Application à la spectroscopie des états de Rydberg du sodium.*

Michel GROSS, *Contribution théorique et expérimentale à l'étude du phénomène de superradiance.*

ACTIVITÉS DIVERSES, CONGRÈS, CONFÉRENCES

Membre du Comité de Rédaction du Livre Blanc sur la Recherche Scientifique.

Conférence invitée au séminaire américano-japonais sur la spectroscopie Laser (Kauai, septembre 1980) : *Photon correlations and resonance fluorescence*.

Séminaire à l'Université de Hanovre (novembre 1980) : *Atoms in intense resonant laser beams*.

Séminaire au C.E.A. (Orme des Merisiers, novembre 1980) : *Physique atomique et problèmes fondamentaux*.

Trois conférences à New York University en tant que S. Klosk lecturer (janvier 1981) : *Are photons essential ? ; Dressed atom approach to resonance fluorescence ; Simple physical pictures for radiative corrections : the Lamb-shift and $g-2$* .

Conférence du soir au Collège de France (février 1981) : *Atomes et photons*.