

Atomes et Photons : des objets familiers pour une physique nouvelle

Jean Dalibard

Avril 1995

L'étude des atomes a joué un rôle essentiel dans la genèse des théories modernes de la physique fondamentale. Ainsi, un des premiers succès de la mécanique quantique, entre 1920 et 1930, fut d'expliquer pourquoi les atomes n'émettent ou n'absorbent de la lumière qu'à certaines longueurs d'onde, fait expérimental dont la physique classique ne pouvait rendre compte. Plus récemment, entre 1940 et 1960, ce sont encore des expériences très précises menées sur l'atome d'hydrogène qui ont conduit à la théorie de l'électrodynamique quantique, qui décrit comment particules matérielles et champ électromagnétique sont couplés.

Pour le physicien des années 1990, les atomes sont des objets familiers et bien compris. Néanmoins l'étude de ces atomes et de leur interaction avec la lumière reste un sujet très riche, qui pose des problèmes sans cesse renouvelés. Le dynamisme de cette branche de la physique provient des spectaculaires perspectives ouvertes par l'utilisation de la lumière laser, de longueur d'onde et de direction extrêmement bien définies; on sait désormais préparer des atomes dans des états sélectionnés, qui permettent d'explorer de nouveaux problèmes physiques. L'utilisation des lasers autorise par exemple des mesures avec une précision toujours croissante, qui constituent des tests sévères des théories existantes; certaines grandeurs physiques fondamentales sont mesurées avec 12 chiffres significatifs, qui doivent bien entendu concorder avec les prédictions théoriques quand les calculs correspondants sont menés avec la même précision. Cette préparation sélective des atomes permet également la réalisation de systèmes modèles, très proches de ceux invoqués par les pères fondateurs de la mécanique quantique dans leur "gedanken experiments" (expériences de pensée). Enfin les lasers permettent de modifier le mouvement des atomes : on peut depuis quelques années refroidir et piéger un gaz d'atomes dans un faisceau lumineux et les températures ainsi atteintes, situées dans le domaine du microKelvin, constituent un record absolu de froid.

Cet exposé cherchera à présenter quelques thèmes de recherche dans ce domaine. Après un bref rappel des notions de base sur la structure atomique, nous expliquerons comment les lasers permettent de manipuler et de refroidir des atomes; ce thème constitue un bon exemple de la richesse des effets rendus possibles par la maîtrise actuelle de l'interac-

tion matière-rayonnement. Nous discuterons ensuite plus brièvement quelques mesures de grande précision qui fournissent des tests des théories fondamentales décrivant le comportement des constituants élémentaires de la matière, puis nous terminerons en décrivant plusieurs perspectives de cette branche de la physique. Il est bien clair que cet exposé ne prétend en aucune façon à l'exhaustivité. Il a été conçu dans le cadre des manifestations célébrant le bicentenaire de l'Ecole normale supérieure, et les exemples ou les illustrations qui suivent ont tous été choisis parmi les thèmes étudiés au sein du laboratoire qui porte le nom de ses deux fondateurs, Alfred Kastler et Jean Brossel.

1 Atomes et Photons : des objets familiers ?

Un atome est constitué par un noyau de charge positive, et des électrons de charge négative. Dans une description classique de l'atome, les électrons tournent autour du noyau comme les planètes autour du soleil, ou comme un satellite autour de la terre. Cette description fort simple est malheureusement incorrecte. Elle prédit en effet que l'énergie interne d'un atome peut être modifiée par une quantité arbitraire, tout comme l'altitude d'un satellite peut être changée à volonté par des fusées auxiliaires. Les expériences prouvent au contraire qu'une mesure de l'énergie interne atomique ne peut donner qu'un ensemble discret de valeurs¹. La mécanique quantique permet de rendre compte de ce résultat expérimental. Dans le cadre de cette théorie, les niveaux d'énergie interne d'un atome sont quantifiés. Après une mesure de son énergie interne, l'atome se trouve obligatoirement sur un de ces niveaux et le résultat de la mesure est donné par l'énergie correspondante (voir figure 1).

La transition d'un niveau d'énergie vers un autre se fait par l'intermédiaire d'un quantum de lumière : le photon (figure 2). L'énergie totale est conservée dans un tel processus; si l'énergie E_i du niveau atomique initial est supérieure à l'énergie E_f du niveau atomique final, il y a *émission* d'un photon dont l'énergie E_{photon} est précisément égale à la différence $E_i - E_f$. Au contraire, pour passer d'un état initial d'énergie E_i inférieure à l'énergie finale E_f , il faut envoyer sur l'atome un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_f - E_i$; il y a alors *absorption* du photon. Le photon peut être considéré comme le grain élémentaire de lumière et il y a une relation étroite entre l'énergie individuelle d'un photon et la longueur d'onde de la lumière correspondante; on peut mesurer cette longueur d'onde λ en envoyant dans un spectroscope la lumière émise par une assemblée d'atomes transitant d'un niveau d'énergie E_i vers un niveau d'énergie inférieure E_f . On trouve alors la relation $E_{\text{photon}} = hc/\lambda$. Dans cette relation, obtenue pour la première fois par Einstein, $h = 6,62 \times 10^{-34}$ J.s représente la constante de Planck et $c = 3 \times 10^8$ m.s⁻¹ la vitesse de la lumière.

¹Il faut distinguer l'énergie interne dont il est question ici, et qui représente l'énergie des électrons en mouvement autour du noyau, de l'énergie externe atomique qui correspond au mouvement du centre de masse de l'atome, et que l'on cherche à diminuer dans les expériences de refroidissement laser décrites dans le prochain paragraphe.

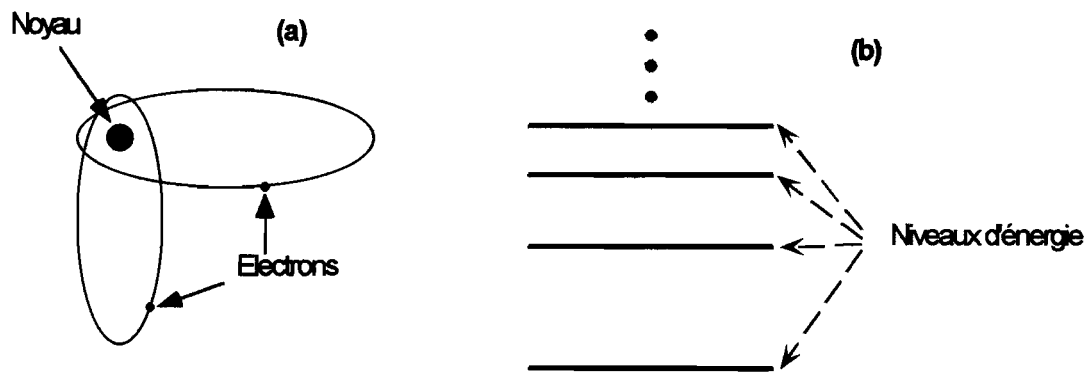


Figure 1: (a) Une image classique de la structure des atomes : les électrons tournent autour du noyau comme les planètes autour du soleil. (b) La prédiction quantique, moins intuitive mais plus conforme à la réalité : les niveaux d'énergie de l'atome sont quantifiés et une mesure de l'énergie interne atomique ne peut donner qu'un de ces valeurs quantifiées.

Un atome isolé, en l'absence de lumière, se trouve toujours dans son niveau d'énergie le plus bas, appelé niveau fondamental. Les quelques longueurs d'onde lumineuses qui permettent de faire passer efficacement l'atome du niveau fondamental vers un niveau excité sont appelées longueurs d'onde de résonance. Pour l'atome de sodium par exemple, la longueur d'onde de résonance la plus connue est située dans le jaune. C'est la lumière produite par les lampes à sodium qui éclairent de nombreux passages souterrains et des monuments comme la Tour Eiffel. Au contraire de l'état fondamental, les niveaux excités sont instables; un atome placé dans un de ces niveaux finit toujours par retomber sur le niveau fondamental par émission spontanée d'un photon. La durée de vie moyenne des niveaux excités se situe généralement autour de quelques dizaines de nanosecondes.

2 Le refroidissement des atomes par laser

Le laser est souvent associé à l'idée de chaleur. Il est utilisé pour découper, pour souder, voir pour détruire des objets matériels. Mais on peut également utiliser cette lumière pour refroidir des gaz atomiques jusqu'à des températures extrêmement basses, de l'ordre du millionième de Kelvin [1]; à ces températures, le mouvement des atomes se fait à vitesse très réduite, de l'ordre du centimètre par seconde. Ces valeurs sont à comparer à celles obtenues à température ambiante, 20 degrés Celsius, soit 293 Kelvins, où la vitesse des atomes est de plusieurs centaines de mètres par seconde.

La principale force qui permet d'agir sur des atomes grâce à la lumière est appelée force de pression de radiation. Son existence avait été pressentie par Keppler, qui expliquait ainsi pourquoi la queue des comètes pointe toujours à l'opposé du soleil; d'après Keppler, cette queue est formée de particules matérielles issues du noyau de la comète qui sont

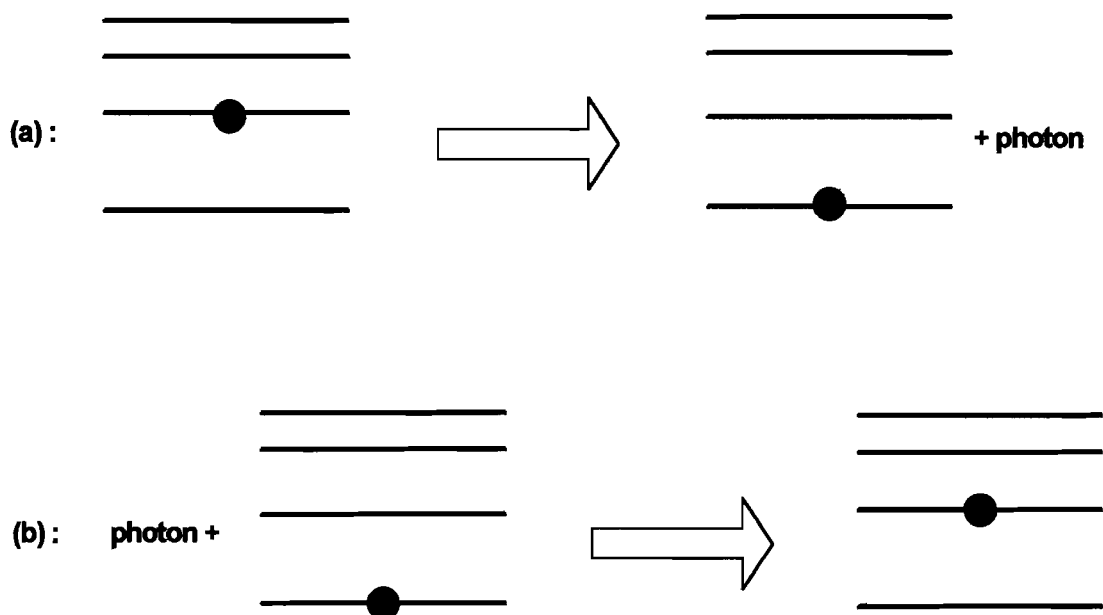


Figure 2: (a) Emission d'un quantum de lumière, le photon, par un atome : un atome dans un niveau d'énergie interne élevé peut tomber vers un niveau inférieur en émettant un photon. (b) Absorption d'un quantum de lumière par un atome, qui bascule alors vers un niveau d'énergie plus élevé.

accélérées par la lumière solaire. On sait maintenant que la réalité est plus complexe et que le vent solaire est responsable pour une part importante de la formation de la queue des comètes. Néanmoins, l'intuition de Kepler reste qualitativement valable.

À l'échelle atomique, la force de pression de radiation est engendrée par la répétition des "chocs" subis par un atome placé dans un faisceau laser résonnant. Un atome initialement dans son niveau d'énergie fondamental peut absorber un photon et passer dans un niveau excité. La quantité de mouvement totale étant conservée, l'absorption s'accompagne d'un changement de vitesse de l'atome $hc/M\lambda$, où M désigne la masse de l'atome. La vitesse élémentaire $hc/M\lambda$ est appelée vitesse de recul; elle varie de 3 m/s pour l'atome d'hydrogène éclairé sur sa raie de résonance principale ($\lambda = 121$ nm), à seulement 3,5 mm/s pour le césium, atome beaucoup plus lourd dont la raie de résonance se situe dans l'infra-rouge proche à $\lambda = 852$ nm. L'atome retombe ensuite sur son niveau fondamental en émettant un autre photon. Ce cycle peut se répéter un grand nombre de fois. Toutes les absorptions communiquent à l'atome un changement de vitesse dans le même sens, alors que les émissions spontanées se font dans des directions aléatoires, et ont donc un effet moyen nul. Il en résulte une force moyenne sur l'atome qui provoque des accélérations atteignant jusqu'à 100 000 fois l'accélération de la pesanteur.

L'intensité de la force de pression de radiation dépend fortement de la vitesse des atomes. En effet, quand un atome bouge, il interagit avec la lumière comme si sa longueur d'onde était modifiée : c'est l'effet Doppler. Cet effet se rencontre couramment dans notre

monde quotidien. Quand un véhicule muni d'une sirène se rapproche de nous, le son de la sirène nous apparaît plus aigu qu'il n'est en réalité. Au contraire, quand le véhicule s'éloigne, le son semble plus grave que celui émis par un véhicule immobile. C'est en partant de cette constatation que deux physiciens, T. Hänsch et A. Schawlow, ont proposé en 1975 de refroidir des atomes avec de la lumière.

Le principe de ce refroidissement est représenté sur la figure 3, dans sa version à une dimension. Ce principe se généralise ensuite aisément aux trois dimensions de l'espace. On éclaire les atomes à refroidir par deux ondes lumineuses identiques se propageant en sens contraire. La longueur d'onde de la lumière est choisie légèrement supérieure à la longueur d'onde de résonance des atomes. Un atome au repos ne subit aucun effet Doppler, il "voit" les deux ondes avec la même longueur d'onde et les forces de pression de radiation créées par ces ondes se compensent. Au contraire, un atome en mouvement voit les deux ondes avec des fréquences différentes; prenons par exemple un atome se dirigeant vers la droite. L'onde venant de la droite, se dirigeant en sens contraire à la vitesse de l'atome, est vue avec une longueur d'onde diminuée, et est donc rapprochée de résonance. L'onde venant de la gauche est vue avec une longueur d'onde plus grande et est éloignée de résonance. Par conséquent, l'atome absorbe surtout des photons de l'onde venant à sa rencontre et la force de pression de radiation résultante est de sens contraire à la vitesse atomique. Ce raisonnement se transpose aisément au cas d'un atome se dirigeant initialement vers la gauche; il s'en suit que, quel que soit le sens initial de la vitesse atomique, la force créée par la lumière est de sens opposé à cette vitesse. Les atomes sont donc toujours ralentis dans cette paire d'ondes laser, l'agitation thermique initiale du gaz atomique est fortement diminuée, et le gaz atomique est refroidi.

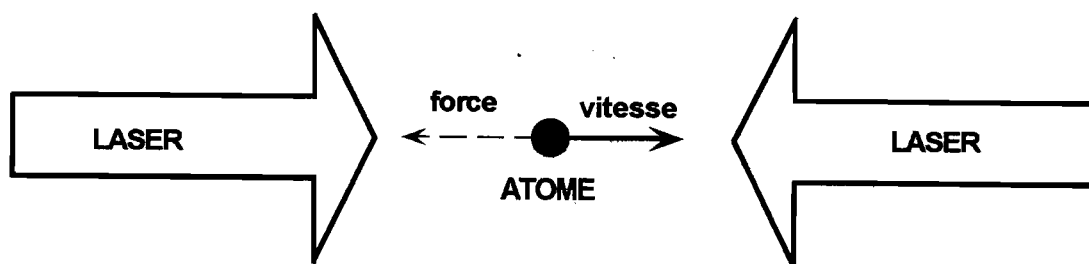


Figure 3: Principe du refroidissement d'atomes par laser, fondé sur l'effet Doppler. Un atome en mouvement absorbe plus de photons provenant de l'onde qui vient à sa rencontre, et il ressent donc une force de pression de radiation de sens contraire à sa vitesse.

A trois dimensions, on dispose trois paires d'onde suivant trois axes deux à deux orthogonaux pour freiner les trois composantes des vitesses atomiques. Le diamètre typique des faisceaux est un centimètre, et la zone dans laquelle s'effectue le refroidissement tri-dimensionnel est donc de l'ordre du centimètre cube. Les atomes capturés dans ce volume sont pratiquement immobilisés et on peut les observer grâce à la lumière qu'ils émettent lorsqu'ils basculent d'un de leurs niveaux excités internes vers leur niveau fondamental. Suivant les expériences, le nombre d'atomes capturés varie entre un million et un milliard.

On dit que l'on dispose d'une "mélasse optique", expression qui traduit bien le fait que les atomes sont englués dans les faisceaux lumineux, comme une cuillère dans un sirop très visqueux. La première mélasse fut réalisée aux USA aux laboratoires Bell en 1985. Depuis cette expérience a été reproduite et améliorée dans de nombreux laboratoires dans le monde, en particulier à l'ENS, dans le groupe de Claude Cohen-Tannoudji.

Pour mesurer la température de ces atomes, il n'est pas possible de plonger un thermomètre dans le gaz refroidi; même si un tel thermomètre existait pour le domaine de température qui nous intéresse ici, le nombre d'atomes serait trop faible pour que ce thermomètre fonctionne correctement. Cette température est déterminée par la mesure de l'agitation résiduelle des atomes. Quelques centimètres sous la mélasse, on envoie un faisceau laser auxiliaire, on coupe à un instant donné les faisceaux laser de mélasse et on mesure les temps d'arrivée des atomes depuis le centre de la mélasse jusqu'à ce faisceau annexe (figure 4). Si les atomes étaient rigoureusement au repos dans la mélasse, ils tomberaient comme une pierre et mettraient tous rigoureusement le même temps pour atteindre le faisceau auxiliaire. Du fait de leurs vitesses résiduelles, il y a une dispersion légère, mais mesurable, des temps d'arrivée des atomes, qu'il est facile de relier à la température des atomes au moment où les faisceaux de mélasse ont été bloqués.

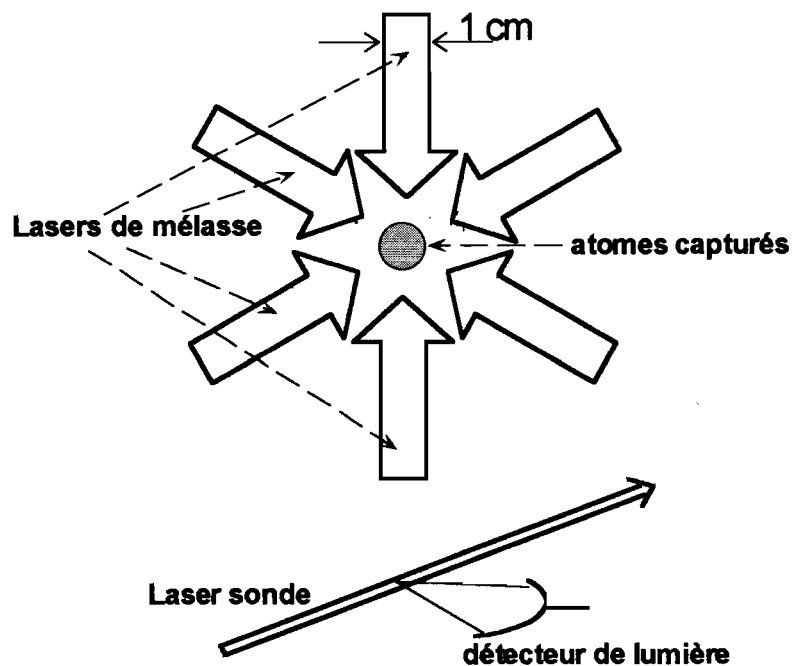


Figure 4: Réalisation d'une mélasse optique; les atomes sont capturés à l'intersection de trois paires d'onde laser deux à deux orthogonales. La température des atomes dans la mélasse est déterminée à partir des temps de chute des atomes depuis la mélasse jusqu'à un faisceau laser sonde situé quelques centimètres sous la mélasse.

La plus basse température pour une mélasse optique a été mesurée à l'ENS en 1991 pour des atomes de césium; elle est de 2,5 microKelvins, ce qui correspond à une vitesse d'agitation résiduelle de 1,2 cm/s. Cette vitesse limite est de l'ordre de 3,5 fois la vitesse de recul introduite plus haut. Remarquons que, pour interpréter correctement le comportement des atomes dans une mélasse aussi froide, il a été nécessaire de remplacer le modèle simple de refroidissement Doppler décrit ci-dessus par des descriptions nettement plus sophistiquées, qu'il serait trop long de décrire ici. Signalons également que la vitesse de recul n'est pas une limite absolue au refroidissement d'atomes par laser. Le groupe de l'ENS a pu mettre au point une méthode concurrente de la mélasse optique qui a déjà conduit à des températures sous la limite du recul dans des expériences menées à une ou deux dimensions, l'extension à trois dimensions étant actuellement en cours de réalisation.

Le refroidissement d'atomes par laser est donc une technique jeune, puisqu'elle a à peine dix ans, mais désormais bien maîtrisée. Elle fournit des gaz atomiques à des températures inatteignables par des méthodes classiques de cryogénie. Ses retombées sont déjà multiples, et leur nombre s'accroît sans cesse. Citons par exemple le domaine de l'interférométrie atomique : on sait grâce à Louis de Broglie que l'on peut associer à toute particule matérielle de vitesse v et de masse M une onde de longueur d'onde $\lambda_{dB} = h/Mv$. A température ambiante, la vitesse v des atomes est grande, et la longueur d'onde de de Broglie petite (10^{-11} mètre). Il est alors difficile de mettre en évidence l'aspect ondulatoire de ces atomes. Au contraire, pour des atomes lents et froids, la longueur d'onde de de Broglie est considérablement augmentée (10^{-7} mètre), et l'on peut concevoir et réaliser plus simplement des expériences mettant en évidence le comportement ondulatoire de ces atomes.

3 Pourquoi des mesures ultra-précises ?

Après avoir décrit comment l'interaction entre atomes et photons permettait de préparer des atomes dans des situations inaccessibles par des moyens classiques, nous passons maintenant à une présentation rapide de quelques autres "succès" récents de cette discipline, fondés sur une caractéristique essentielle : la possibilité de faire dans ce domaine des mesures ultra-précises des différentes quantités physiques en jeu dans une expérience. Ce trait propre à la physique atomique est la conjonction de deux remarques. D'une part, c'est une physique de la matière diluée; les atomes en jeu peuvent être considérés comme isolés ou faiblement couplés à leurs voisins; les problèmes liés à l'inhomogénéité de l'environnement du sujet d'étude, rencontrés par la plupart des physiciens de la matière condensée, ne se posent donc pas ici. D'autre part, c'est une physique basse énergie, et l'on peut donc agir de manière très sélective sur les atomes au moyen de faisceaux laser dont les caractéristiques sont bien contrôlées.

Nous avons indiqué en introduction comment la mécanique quantique permettait de prédire la position des niveaux d'énergie des atomes. Pour l'atome le plus simple, c'est-à-dire l'atome d'hydrogène, qui ne comporte qu'un seul électron, cette prédiction est

Incertitude sur la constante de Rydberg

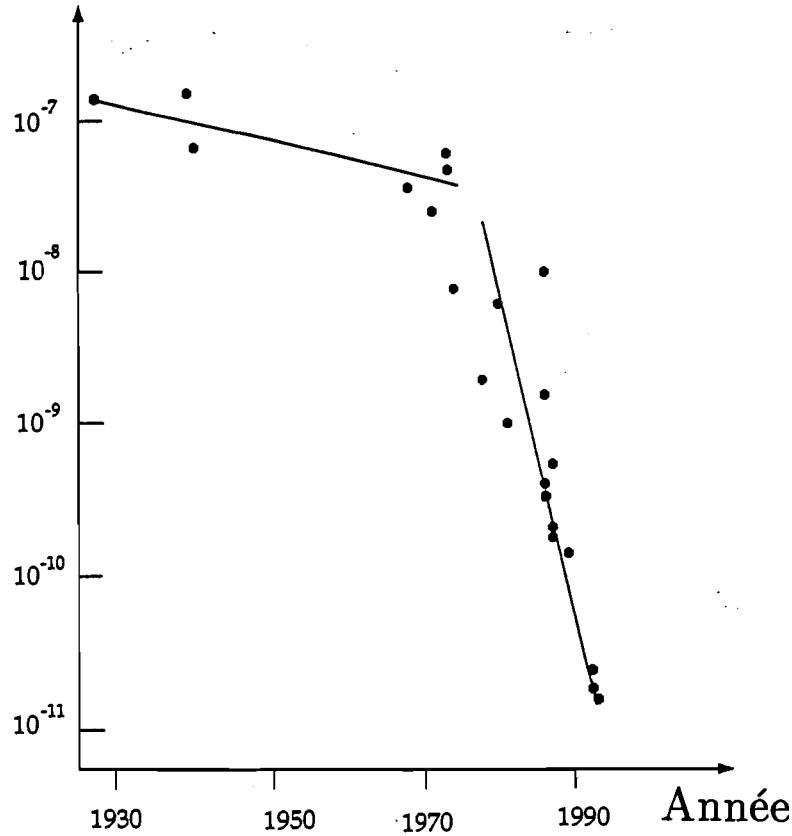


Figure 5: *La précision expérimentale sur la mesure de la constante de Rydberg.*

remarquablement simple [2]. Les niveaux d'énergie sont repérés par un entier n , variant de 1 pour le niveau fondamental à des valeurs arbitrairement grandes; la longueur d'onde λ_{nm} de la lumière émise quand un atome transite d'un niveau n vers un niveau inférieur m est donnée par la formule :

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

La détermination de la constante R , appelée constante de Rydberg, et sa confrontation avec les prédictions théoriques constitue donc un test essentiel de la mécanique quantique. L'évolution au cours des années de la précision avec laquelle cette constante est connue est reportée sur la figure 5. Une rupture de pente très significative s'est produite au milieu des années 1970, avec l'apparition des lasers accordables à une transition de résonance de l'atome d'hydrogène. La valeur la plus précise de la constante de Rydberg,

$$R = 109737,3156834 \pm 0,0000024 \text{ cm}^{-1}$$

a été obtenue l'an passé au laboratoire Kastler Brossel de l'ENS par François Biraben, Lucile Julien et leur équipe. L'accord de cette mesure avec les prédictions théoriques les plus récentes est excellent.

L'interaction électromagnétique, responsable de la liaison entre le noyau et les électrons d'un atome n'est qu'une des quatre interactions fondamentales de la nature. Les

trois autres interactions sont l'interaction forte, responsable de la cohésion des noyaux, l'interaction faible responsable de certains modes de radioactivité, et l'interaction gravitationnelle. On pourrait croire que la physique atomique ne peut pas apporter de renseignements sur ces autres interactions, du fait de la différence des échelles d'énergie en jeu. Pourtant, des caractéristiques importantes de l'interaction faible ont pu être déterminées à partir d'expériences de physique atomique [3]. Ceci a été possible en tirant parti du fait que ces interactions faibles violent la parité. En d'autres termes, les résultats d'une expérience mettant en jeu les interaction faibles ne sont pas identiques à ceux d'une deuxième expérience représentant l'image miroir de l'expérience initiale. La prédiction d'effets de violation de la parité en physique atomique a été faite par Marie-Anne et Claude Bouchiat au laboratoire de l'ENS, et ces effets ont ensuite été mis en évidence, en particulier dans leur groupe. Il s'agit d'effets extrêmement petits, mais rendus détectables par la grande précision des mesures effectuées. Les résultats obtenus fournissent sur les paramètres de la théories des interactions faibles des informations complémentaires de celles obtenues dans les grands accélérateurs.

L'étude du chaos est un autre exemple de domaine où la physique atomique a pu apporter des renseignements importants. Il peut sembler paradoxal qu'une discipline dans laquelle des efforts considérables sont faits pour préparer des systèmes toujours plus purs et mieux contrôlés puisse trouver un sujet d'étude dans la science du chaos, domaine qui est apparenté dans notre langage quotidien à celui du désordre. Mais ce paradoxe n'est qu'apparent. Le chaos se définit en physique classique par une très grande sensibilité aux conditions initiales, qui rend imprédictible le comportement d'un système aux temps longs. On sait qu'il faut pour observer du chaos disposer d'un système avec plusieurs degrés de liberté fortement couplés. L'atmosphère terrestre est un exemple d'un tel système, ce qui rend les prédictions météorologiques à long terme quasi-impossibles. A l'échelle microscopique, on peut chercher si le mouvement des électrons autour du noyau peut comporter un aspect chaotique. La réponse est positive, même pour l'atome d'hydrogène avec son unique électron. La seule contrainte est de placer l'atome dans un champ magnétique suffisamment intense. Les trajectoires de l'électron autour du noyau, calculées comme si l'électron obéissait aux lois de la physique classique, montrent alors toutes les caractéristiques d'un système chaotique (figure 6). Se pose alors un deuxième problème redoutable. Puisque l'on sait que la description correcte d'un atome repose sur la physique quantique et non sur la physique classique, il s'agit de déterminer comment se transcrit, sur les niveaux d'énergie de l'atome, le chaos trouvé classiquement. La résolution de ce problème, qui est étudié en particulier par Dominique Delande et son groupe au laboratoire Kastler Brossel, passe par des analyses mathématiques compliquées sur la distribution statistique des niveaux d'énergie, qui dépassent le cadre de cet exposé. Signalons néanmoins qu'ici encore, un excellent accord entre prédictions théoriques et mesures expérimentales a pu être obtenu.

Direction du champ magnétique

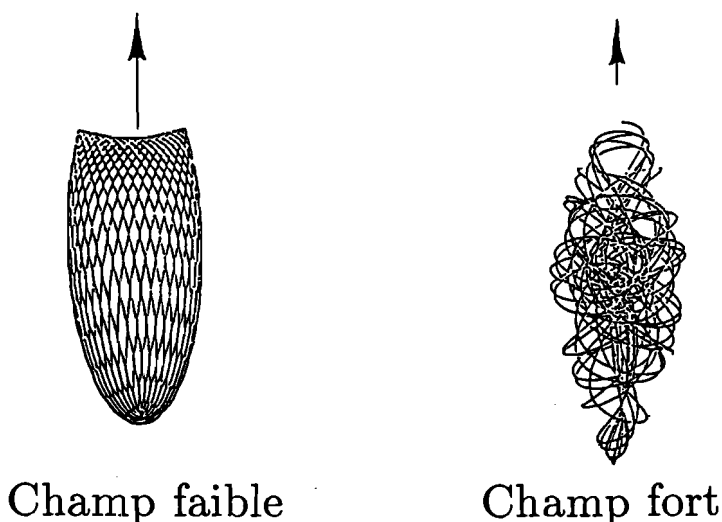


Figure 6: *Le chaos en physique atomique. Le mouvement classique de l'électron autour du noyau est régulier si cet atome est plongé dans un champ magnétique faible. En revanche, lorsque le champ magnétique est assez intense, le mouvement de l'électron présente une très grande sensibilité aux conditions initiales, caractéristiques d'un système chaotique.*

4 Perspectives

En recherche fondamentale, il est toujours risqué de chercher à énumérer les perspectives à long terme d'un domaine. D'une manière somme toute rassurante quant à la vitalité de cette discipline, il semble que l'histoire s'ingénie à contredire ceux qui ont cherché à planifier ce que devraient être les découvertes à venir. Essayons néanmoins de dégager quelques grands thèmes qui devraient se développer dans les prochaines années. Une tendance essentielle de notre branche de la physique est la réalisation de systèmes modèles; le refroidissement d'atomes par laser permet de manipuler des systèmes quantiques individuels; on a pu piéger un ion ou un électron unique [4], on sait réaliser des cavités contenant un photon ou moins dans le mode résonnant avec un type d'atome donné [5]. Ces systèmes modèles devraient autoriser des illustrations toujours plus subtiles et précises des principes de base de la mécanique quantique. Une deuxième tendance est constituée par un passage du simple au complexe; un problème ouvert est par exemple le comportement collectif d'une assemblée d'atomes froids, si l'on arrive à accumuler suffisamment d'atomes dans un volume donné pour que les distances interatomiques deviennent de l'ordre de la longueur d'onde de de Broglie. La physique statistique quantique prédit un comportement spectaculaire pour un tel gaz atomique (condensation de Bose-Einstein), mais on ignore pour le moment si ce comportement ne sera pas masqué par d'autres interactions entre atomes, tendant par exemple à former des molécules puis des agrégats d'atomes qui s'échapperaient des mélasses. La dernière tendance que je signalerai ici consiste à pousser

plus loin les test des théories et des symétries fondamentales. Nous avons vu comment la violation de la symétrie de parité avait permis d'étudier l'interaction faible à partir d'expériences de physique atomique. Ce type d'expériences devrait se développer avec en ligne de mire la réalisation du premier atome d'anti-matière : on manipule quotidiennement des anti-électrons et des anti-protons, mais on n'a encore jamais réussi à les lier ensemble pour former un atome d'anti-hydrogène. De gros efforts se poursuivent dans ce sens, dont le but est la détermination des niveaux de l'anti-hydrogène. Toutes les théories actuelles postulent que ces niveaux ont rigoureusement la même énergie que ceux de l'hydrogène, mais une vérification expérimentale constituerait une étape très importante pour les physiciens.

Références

- [1] A. Aspect et J. Dalibard, "Le refroidissement des atomes par laser", La Recherche (Janvier 1994).
- [2] T.W. Hänsch, A.L. Schawlow et G.W. Series, "Le spectre de l'hydrogène atomique", Pour la Science (Mai 1979).
- [3] M.A. Bouchiat et L. Pottier, "La préférence des atomes entre la gauche et la droite", Pour la Science (Août 1984).
- [4] C. Cohen-Tannoudji, "Piéger et observer un seul atome", Revue du Palais de la Découverte, volume 17, page 34 (1989).
- [5] S. Haroche et J.-M. Raimond, "Electrodynamique quantique en cavité", Pour la Science (Juin 1993).