

COLLÈGE DE FRANCE

CHAIRE DE PHYSIQUE ATOMIQUE
ET MOLÉCULAIRE

LEÇON INAUGURALE

faite le Mardi 11 Décembre 1973

PAR

M. CLAUDE COHEN-TANNOUJJI

Professeur

Monsieur l'Administrateur,
Mes chers Collègues,
Mesdames, Messieurs,

« Expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple. » Cette phrase de Jean Perrin illustre parfaitement l'étape qu'a constituée l'hypothèse atomique dans le développement de la Science. La reconnaissance du fait que toute matière est formée par un agrégat d'unités élémentaires appelées atomes, s'attirant mutuellement et en mouvement d'agitation permanent, a clarifié notre vision du monde. Bien que les atomes soient trop petits pour être directement accessibles à notre perception, leur existence permet d'interpréter très simplement des phénomènes aussi divers que la chaleur, le comportement des gaz, la fusion des solides, les réactions chimiques... Et ce sont les mêmes atomes que l'on retrouve dans une roche inerte, une fleur, un être humain, une étoile lointaine...

Cet invisible dont parle Jean Perrin est-il cependant aussi simple qu'on pourrait le croire au premier abord? Lorsque les Physiciens commencèrent à explorer de manière plus précise le monde de l'atome pour essayer de comprendre sa structure et les lois qui régissent son comportement, ils se heurtèrent vite à de graves difficultés. Nos concepts intuitifs, basés sur notre expérience quotidienne du monde macroscopique qui nous entoure, se révélèrent totalement erronés à l'échelle atomique; l'atome était incompréhensible dans le cadre de la physique classique. Pour percer ces nouveaux mystères, il fallut donc, après de longs tâtonnements, élaborer des concepts entièrement nouveaux, les concepts

de la mécanique quantique, et la pensée scientifique subit ainsi, vingt ans après la révolution relativiste qui avait détrôné les notions de temps et d'espace absolus, un second bouleversement dramatique : on renonça à l'idée qu'un objet atomique pût avoir à tout instant une position et une vitesse bien définies ; on abandonna la notion de trajectoire.

Aujourd'hui, nous sommes plus familiers avec les concepts quantiques. Nous utilisons pour décrire les atomes un langage fort éloigné de celui de la vie courante, plus mathématique, plus abstrait : nous parlons de niveaux d'énergie, de fonctions d'onde, d'hamiltonien, de diagrammes de Feynman... Et cette structure théorique nous permet d'analyser et de comprendre les innombrables observations qui sont effectuées sur les atomes avec des moyens de plus en plus élaborés. Quelles ont été les principales étapes qui nous ont conduits à cette vision moderne de l'atome? Où en est actuellement la physique atomique? Quelle est sa contribution au développement de nos connaissances et vers quoi s'oriente-t-elle? C'est à un rapide survol de ces quelques problèmes qu'il nous a semblé intéressant de consacrer cette première leçon.

* * *

Ce sont les philosophes grecs qui, les premiers, eurent l'intuition que la matière ne pouvait être divisée indéfiniment, l'atome étant l'étape ultime de cette partition. Il fallut attendre près de vingt-cinq siècles pour que cette idée fût reprise de manière scientifique. On s'aperçut vite d'ailleurs que les atomes ne sont pas insécables, mais constitués par un noyau central massif, très localisé, chargé positivement et attirant autour

de lui des électrons plusieurs milliers de fois plus légers que le noyau et chargés négativement. Les noyaux eux-mêmes ne sont pas plus indivisibles que les atomes : ils sont formés de particules plus élémentaires, les nucléons, liées étroitement les unes aux autres par des forces nucléaires, beaucoup plus intenses que les forces électromagnétiques qui s'exercent entre le noyau et les électrons. En plus des nucléons, on sait maintenant qu'il existe un très grand nombre d'autres particules, plus ou moins instables, qui se transforment les unes dans les autres, et dont l'étude relève de la physique des particules élémentaires. Certaines théories prédisent même que les nucléons ont une structure composite. Quelle est donc finalement l'étape ultime de partition de la matière? Nul ne peut encore répondre de manière sûre à cette question.

Mais revenons à l'étude de l'atome et fixons tout d'abord quelques ordres de grandeur. Imaginons que l'on agrandise un atome mille milliards de fois : les électrons évolueraient dans un volume sphérique dont le rayon vaudrait environ cent mètres ; au centre de ce volume, le noyau apparaîtrait comme une petite sphère dont le rayon serait seulement de l'ordre du millimètre. La première image qui est venue alors à l'esprit des physiciens est celle d'un atome planétaire, les électrons légers gravitant autour du noyau central massif comme les planètes autour du soleil. Bien que séduisante, cette image ne résiste cependant pas à un examen sérieux : perdant de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, les électrons se rapprocheraient progressivement du noyau pour venir finalement s'y perdre. Les atomes seraient donc instables et ne pourraient pas exister ; telle est la conclusion absurde à laquelle conduisent la mécanique et l'électromagnétisme classiques.

Il ne fut pas facile cependant de renoncer à l'image d'un électron suivant une trajectoire bien définie autour du noyau. L'idée intuitive que nous nous faisons du mouvement d'un point matériel repose en effet sur notre observation du comportement d'objets courants comme des pierres, des balles de tennis..., et nous avons trop tendance, peut-être par manque d'imagination, à nous contenter de transposer nos concepts dans les domaines nouveaux que nous abordons. Aussi ne faut-il pas s'étonner de retrouver l'image des orbites électroniques dans la première ébauche quantitative d'une théorie atomique, la théorie de Bohr. Pour expliquer la stabilité des atomes, Bohr introduisit des orbites privilégiées sur lesquelles il postulait que l'électron devait nécessairement se déplacer sans pouvoir rayonner ; les spectres discrets de raies d'émission étaient interprétés par des « sauts quantiques » de l'électron d'une orbite privilégiée à une autre. Si un tel modèle permettait de rendre compte avec une précision remarquable du spectre de l'atome d'Hydrogène, que de problèmes délicats ne soulevait-il pas ! Pourquoi l'électron ne rayonne-t-il pas sur son orbite à la fréquence de rotation ? Quelle est la nature de ce mystérieux saut quantique ? Bohr était parfaitement conscient des défauts de son modèle et il ne le considérait que comme une étape intermédiaire vers une compréhension plus satisfaisante de l'atome, une première tentative pour trouver un fil directeur à travers la multitude des faits expérimentaux. Qu'il est difficile, à la veille d'un bouleversement profond de nos concepts, de relier entre eux les phénomènes nouveaux qui laissent pressentir ce bouleversement à l'aide d'un langage ancien complètement inadapté à la situation ! On ne peut qu'admirer les fondateurs de la théorie

atomique, considérés un peu comme des mystiques par leurs collègues plus conservateurs, pour avoir réussi malgré tout à préparer le tremplin qui allait permettre à la Physique d'effectuer un prodigieux bond en avant. Pour comprendre leur état d'esprit, le mieux est peut-être de citer cette phrase de Bohr rapportée par Heisenberg : « Nous devons nous rendre compte que nous ne pouvons nous servir ici du langage qu'à la manière des poètes qui, eux aussi, ne cherchent pas à représenter les faits de façon trop précise, mais seulement à créer des images dans l'esprit de leur public et à établir des connexions sur le plan des idées. »

Effectivement le nouveau langage et les nouveaux concepts devaient voir le jour à la suite des travaux de de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Born, Dirac, et bien d'autres.

Nous avons ainsi appris à caractériser l'état d'un électron à un certain instant, non pas par sa position et sa vitesse, mais par la donnée d'un nombre complexe en chaque point de l'espace, c'est-à-dire encore par une fonction d'onde dont l'évolution au cours du temps est régie par une équation aux dérivées partielles appelée équation de Schrödinger. Au concept de trajectoire, constituée par la suite des points représentant les divers états successifs du corpuscule classique, s'est ainsi substitué celui de la propagation d'une onde.

Cela signifie-t-il qu'on s'est orienté vers une conception purement ondulatoire de l'électron? Certes non, car l'aspect corpusculaire demeure présent dans les impacts localisés auxquels l'électron donne naissance dans un détecteur. Il se trouve d'ailleurs que l'on ne peut prédire avec certitude en quel point de l'espace l'électron va se manifester lorsqu'on cherche à le détecter ; on ne peut que donner la probabilité d'un tel

événement, à partir précisément de la fonction d'onde.

Cette même fonction d'onde permet également d'évaluer la dispersion des valeurs de la vitesse de l'électron et l'on trouve alors un résultat bien surprenant : si l'on prend une fonction d'onde de plus en plus localisée, c'est-à-dire correspondant à une dispersion de plus en plus faible de la position, alors la dispersion sur la vitesse devient de plus en plus grande. Voilà qui nous interdit d'attribuer à l'électron une position et une vitesse simultanément bien définies.

Peut-on au moins se représenter un électron atomique comme un petit paquet d'ondes dont le centre décrirait autour du noyau une orbite circulaire ou elliptique? Cette image planétaire rendue quelque peu floue du fait du remplacement du corpuscule par un paquet d'ondes est inexacte. Dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, c'est-à-dire dans l'état d'énergie la plus basse, la fonction d'onde est stationnaire ; elle ne se propage pas et a l'allure d'un nuage sphérique centré autour du proton et remplissant tout le volume de l'atome. L'électron est complètement délocalisé à l'intérieur de ce volume.

Il nous faut donc penser aux divers objets atomiques en termes tout à fait différents. Nous devons renoncer à projeter sur eux les images courantes qui nous sont familières et admettre qu'ils peuvent avoir des propriétés spécifiques et originales. Ce sont alors les concepts quantiques qui s'imposent à nous puisque eux seuls permettent de comprendre et de prévoir le comportement de ces objets dans telle ou telle situation. Bien plus, ces nouveaux concepts englobent les anciens, puisque tout objet, étant formé d'atomes, obéit aux lois de la mécanique quantique, même si les effets quantiques, toujours sous-jacents, sont la plupart du

temps assez peu apparents au niveau macroscopique.

Aux alentours de 1930, la physique atomique connaissait ainsi un âge d'or qui allait s'étendre sur une période de quelques années. La mécanique quantique était appliquée avec succès à de nombreux problèmes tels que la liaison chimique, l'absorption et l'émission de photons, les spectres moléculaires, le ferromagnétisme... On avait l'impression que tous les secrets de l'atome étaient percés et que l'équation de Schrödinger pourrait tout expliquer pourvu que l'on surmontât des difficultés purement mathématiques. L'atome perdait alors quelque peu de son charme et l'intérêt des physiciens se déplaçait progressivement vers les problèmes nouveaux posés par la matière nucléaire et les particules élémentaires. C'était, pour la physique atomique, le début d'une longue période de stagnation qui devait durer jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale. Puis, à partir de cette époque, on assista à un renouveau de cette discipline, à un essor continu qui se poursuit encore aujourd'hui. Des physiciens de plus en plus nombreux se consacrent aux problèmes posés par les atomes, molécules et ions, à l'étude de leurs interactions mutuelles et de leur couplage avec les photons. De nombreuses et spectaculaires applications de ces travaux, telles que les masers et lasers, voient le jour, et permettent à leur tour d'approfondir nos connaissances dans des domaines très variés.

Pourquoi un tel renouveau et vers quoi débouche-t-il? C'est ce que nous allons essayer maintenant de préciser au moyen de quelques exemples empruntés à divers domaines de la physique atomique moderne. A travers ces quelques exemples, nous aimerions également faire sentir ce qui rend cette discipline attirante, la diversité des aspirations intellectuelles qu'elle arrive

à satisfaire et des talents qui peuvent s'y exprimer. Ainsi, tel physicien recherchera l'harmonie profonde qui se dégage des lois fondamentales cachées derrière les phénomènes observés, tel autre sera séduit par l'imagination et la fantaisie qui président à l'élaboration d'une nouvelle méthode ou d'un nouveau dispositif, tel autre enfin appréciera les domaines frontières où se trouvent mêlés des techniques et des concepts très variés.

* * *

Le premier exemple que j'envisagerai a trait aux expériences de haute précision effectuées sur des systèmes atomiques simples. Ce sont en effet ces expériences qui nous ont permis de parvenir à une compréhension plus profonde et plus satisfaisante des interactions électromagnétiques qui s'exercent entre particules chargées.

A la fin de la guerre, l'électronique avait fait des progrès considérables, grâce notamment à la mise au point du radar : on avait appris à construire des dispositifs permettant de produire, d'amplifier et de détecter des ondes électromagnétiques dans diverses gammes de fréquence. De plus, on savait réaliser des jets d'atomes dans des vides poussés et utiliser des détecteurs sensibles. Les circonstances étaient donc très propices à l'éclosion de nouvelles méthodes d'exploration de la structure des atomes. Les travaux antérieurs de Rabi et de ses élèves sur les résonances induites sur des jets atomiques, la découverte par Bloch, Purcell et Pound de la détection radioélectrique de la résonance magnétique, ouvrirent une nouvelle branche de la spectroscopie, la spectroscopie hertziennne, et per-

mirent de mesurer avec une précision inégalée par ailleurs la structure fine et hyperfine des niveaux atomiques et moléculaires. Faut-il ne voir là qu'une tendance au perfectionnisme, une course après les décimales? Ce serait oublier qu'en Physique, une très petite anomalie provoque parfois une refonte totale de nos idées.

C'est dans cette perspective qu'apparaît l'intérêt présenté par les systèmes simples. Lorsqu'une anomalie se présente, on est moins tenté de l'attribuer à la complexité du système qui interdit une résolution exacte des équations, et on remet plus facilement en cause les lois fondamentales sur lesquelles reposent ces équations. Prenons par exemple l'atome le plus simple, c'est-à-dire l'atome d'hydrogène formé d'un électron et d'un proton. Les énergies des états liés de ces deux particules dépendent cruciallement des interactions qui s'exercent entre elles. La mesure précise de ces énergies fournit donc un test très sévère de la validité à très courte distance de la loi de Coulomb, utilisée d'ordinaire pour décrire l'attraction entre l'électron et le proton. On comprend alors l'importance de la découverte par Lamb d'un léger écart entre les deux premiers niveaux excités de l'atome d'hydrogène, écart inexplicable à partir de l'équation de Dirac qui permet de calculer les états stationnaires d'un électron relativiste plongé dans un potentiel coulombien. L'interprétation de cette anomalie stimula toute une série de travaux d'où devait émerger une nouvelle théorie quantique et relativiste des interactions entre particules chargées et photons, l'électrodynamique quantique.

Il ne peut être question ici d'entrer dans le détail de cette théorie, qui sert de modèle à bien d'autres, ni de discuter des problèmes mathématiques qu'elle soulève.

Je voudrais plutôt donner une idée des nouvelles images qui nous sont suggérées, notamment par les « diagrammes de Feynman », petits schémas que les physiciens utilisent pour classer et visualiser les divers processus qui entrent en jeu.

Les interactions élémentaires qui apparaissent dans la théorie, et qui permettent de comprendre toutes les autres, sont les émissions ou absorptions d'un « quantum de lumière », c'est-à-dire d'un photon, par une particule chargée. On peut calculer les amplitudes de probabilité associées à ces processus, ainsi que celles qui décrivent la propagation d'un photon ou d'une particule entre deux actes élémentaires d'émission ou d'absorption.

Considérons par exemple une particule chargée, initialement isolée, sur laquelle n'arrive donc aucun photon. N'ayant rien à absorber, elle ne peut qu'émettre un photon. Il se trouve cependant que l'énergie et l'impulsion ne peuvent être globalement conservées au cours d'un tel processus. La mécanique quantique indique alors que la nouvelle situation ainsi créée ne peut durer indéfiniment : le photon émis doit être réabsorbé par la particule, au bout d'un temps d'autant plus court que le défaut d'énergie est plus grand. On qualifie souvent de « virtuel » un tel photon qui n'apparaît que de manière fugitive. Cela ne doit pas faire croire cependant qu'aucun effet réel ne lui est associé. La particule chargée est en effet entourée, « habillée », par les photons virtuels qu'elle émet et réabsorbe sans cesse, et ses propriétés physiques deviennent différentes de celles de la particule « nue » : elle est alourdie par l'énergie du nuage de photons qu'elle entraîne avec elle ; on peut montrer également que son moment magnétique est modifié et devient comme on dit « anormal ».

Si une autre particule chargée passe à proximité de la première, un photon virtuel émis par l'une peut être réabsorbé par l'autre. C'est par un tel échange de photons virtuels que l'on décrit maintenant les interactions électrostatiques et magnétiques qui s'exercent entre deux particules. Notons d'ailleurs que ces échanges sont légèrement perturbés par la présence des nuages de photons virtuels qui habillent chaque particule : elles n'interagissent donc pas exactement de la même manière que si elles étaient « nues ».

Un photon lui-même peut se désintégrer en une paire particule-antiparticule, par exemple électron-positron, μon^+ - μon^- , méson π^+ -méson π^- ... Comme précédemment, un tel processus ne peut conserver l'énergie et l'impulsion globales. Peu de temps après sa création, la paire doit donc s'annihiler pour redonner naissance au photon initial. Il n'empêche qu'une telle métamorphose éphémère se produisant sur un photon virtuel échangé par deux particules chargées permet au vide qui les sépare de se polariser et constitue une nouvelle source de modifications pour les interactions électromagnétiques qui s'exercent entre elles.

On pourrait ainsi analyser des diagrammes de Feynman de plus en plus complexes, c'est-à-dire comportant de plus en plus de photons et de paires virtuelles. On voit donc qu'il n'existe pas de loi simple d'interaction entre deux particules chargées. La simplicité se retrouve à un niveau plus profond, dans les pièces élémentaires de ce nouveau jeu de construction qui, imbriquées d'une certaine façon les unes dans les autres, forment un diagramme de Feynman décrivant un certain processus d'interaction entre les deux particules. Plus grande est la précision expérimentale, plus nombreux et plus complexes sont les diagrammes de

Feynman qu'il faut faire intervenir pour rendre compte des observations expérimentales. Si la physique atomique permet de tester valablement l'électrodynamique quantique et soutient à cet égard la comparaison avec les expériences de haute énergie, elle le doit donc à la très grande précision de ses mesures. Pour expliquer le déplacement de Lamb, par exemple, il faut calculer tous les diagrammes jusqu'au quatrième ordre inclus, c'est-à-dire tous les diagrammes faisant intervenir au moins quatre actes élémentaires d'interaction. De même, l'interprétation des mesures d'anomalie magnétique sur l'électron et le muon nécessite le calcul des diagrammes d'ordre six, calcul qui n'a pu récemment être mené au bout que grâce à l'utilisation d'ordinateurs. Certains de ces diagrammes font intervenir des processus de diffusion entre photons virtuels; ces processus se trouvent ainsi détectés indirectement grâce à la précision des mesures, alors que la section efficace de diffusion photon-photon est trop faible pour qu'un tel phénomène puisse être mis directement en évidence sur des photons réels qu'on enverrait l'un sur l'autre.

Il importe également de réaliser que l'électrodynamique quantique n'est pas un monde fermé et qu'il est impossible d'isoler les interactions électromagnétiques des autres interactions connues dans la nature, comme par exemple les interactions fortes auxquelles sont sensibles les nucléons, les mésons π , et plus généralement les hadrons. En effet, les photons virtuels qui apparaissent dans les diagrammes de Feynman associés aux systèmes électrodynamiques peuvent se transformer de manière éphémère en hadrons; il en résulte des corrections appelées hadroniques auxquelles les mesures peuvent être sensibles si elles sont suffisamment précises. A la suite des impressionnantes

vérifications expérimentales effectuées ces dernières années, la tendance générale qui se dessine est de faire confiance à l'électrodynamique quantique pour calculer la contribution des effets purement radiatifs, et de soustraire ensuite les corrections ainsi calculées des résultats expérimentaux pour obtenir et étudier les effets hadroniques. Dans le même ordre d'idées, on peut mentionner le problème de la structure hyperfine de l'hydrogène qui, grâce à la réalisation du maser à hydrogène, est connue avec douze chiffres significatifs. Pour interpréter théoriquement une telle structure qui, en première approximation, est due aux interactions entre les moments magnétiques de l'électron et du proton, il n'est pas suffisant de considérer le proton comme une particule ponctuelle. Il faut tenir compte, non seulement de sa structure statique, c'est-à-dire de la distribution de charge et de magnétisation à l'intérieur du proton, mais encore de sa polarisabilité qui fait intervenir les divers états excités du nucléon. Ce sont ces problèmes qui constituent l'intérêt majeur des études théoriques poursuivies sur la structure hyperfine de l'hydrogène.

Une autre tendance mérite également d'être soulignée, celle qui consiste à étudier des systèmes atomiques qui, s'ils restent simples et rappellent l'atome d'hydrogène, sont de moins en moins courants, de plus en plus exotiques. Ce sont par exemple des systèmes purement électrodynamiques comme le positronium ou le muonium, états liés formés par un électron avec un positron ou un muon ; des ions hydrogénoïdes fortement chargés obtenus par arrachement de tous les électrons sauf un à des ions accélérés traversant une mince feuille de carbone ; des atomes muoniques résultant de la capture d'un muon négatif par un noyau comme un

proton ou une particule α . Pourquoi étudier de tels systèmes? Tout d'abord pour analyser l'influence des divers paramètres tels que la masse et la charge des particules. Par exemple, la différence de masse entre l'électron et le muon entraîne que la distance moyenne entre le noyau et le muon dans un atome muonique est deux cents fois plus petite environ que celle qui sépare le noyau et l'électron dans l'atome ordinaire correspondant; les effets de polarisation du vide deviennent alors spectaculaires, l'intervalle de Lamb tombe dans le domaine optique, de sorte qu'on espère pouvoir induire la transition correspondante non plus avec une source micro-ondes, mais avec un laser. Une autre motivation de ces travaux réside dans l'espoir secret qu'en étudiant des systèmes de plus en plus exotiques, on pourra mettre en défaut l'électrodynamique quantique. C'est dans la même perspective qu'il faut situer les tests sur les grandes symétries des lois physiques. La découverte de la non-conservation de la parité dans les interactions faibles, montrant que ces interactions permettent de donner un sens absolu à la droite et à la gauche, a rendu les physiciens très prudents en ce qui concerne l'évidence des symétries. A l'heure actuelle, rien ne permet d'affirmer que les interactions électromagnétiques ne sont pas invariantes par réflexion à travers un miroir ou par renversement du sens du temps. Une telle invariance n'a cependant rien d'évident. Si elle se trouvait infirmée par l'expérience, un réexamen sérieux de nos idées s'avérerait nécessaire.

* * *

J'en viens maintenant à ce qui me semble être une autre composante importante du renouveau de la

physique atomique : des structures entièrement nouvelles peuvent être imaginées par le physicien lorsqu'il réexamine avec des yeux neufs des phénomènes connus, aux lois bien établies, et qu'il associe ces phénomènes les uns aux autres de manière inattendue ; un peu comme l'artiste qui, par un agencement particulier de couleurs et de formes simples, crée sur sa toile des images originales.

Le premier exemple que j'ai choisi pour illustrer une telle situation est celui du pompage optique, car il montre bien la variété des problèmes qui peuvent être abordés lorsqu'on combine de manière élégante des phénomènes très simples, en l'occurrence la résonance optique, découverte par Wood en 1905, et la conservation globale du moment cinétique lors des interactions entre matière et rayonnement, établie par Rubi-nowicz en 1918. Le deuxième exemple que je considérerai ensuite est celui des lasers, instruments qui n'ont pas fini de nous surprendre et qui utilisent de manière très ingénieuse les propriétés de l'émission induite, énoncées par Einstein dès 1917.

Nous allons donc nous pencher tout d'abord sur une autre caractéristique des atomes, leur moment cinétique, mot qui évoque la rotation d'une toupie autour de son axe, ou encore telle figure de patinage artistique. Ces images ne s'appliquent cependant pas bien aux objets quantiques que sont les atomes. La projection de leur moment cinétique sur un axe quelconque de l'espace ne varie pas de façon continue et ne peut prendre qu'une suite discrète de valeurs régulièrement espacées. A chacun de ces états correspond d'ailleurs une valeur différente de la projection du moment magnétique atomique, et par suite également une énergie de couplage différente avec un champ magnétique que

l'on appliquerait le long de cette direction. Ainsi s'explique l'effet Zeeman, c'est-à-dire le fait qu'en présence d'un champ magnétique un niveau atomique se décompose en un nombre fini de sous-niveaux d'énergies légèrement différentes, appelés sous-niveaux Zeeman.

Si l'on considère un ensemble d'atomes en équilibre thermodynamique, on peut montrer aisément que, pour un niveau donné, les populations des divers sous-niveaux Zeeman sont égales en champ nul, de sorte qu'aucune orientation du moment cinétique n'est privilégiée par rapport aux autres ; on dit que l'échantillon n'est pas polarisé. Il faudrait maintenir l'enceinte contenant les atomes à une température extrêmement basse et la plonger dans un champ magnétique très élevé, pour obtenir un léger surpeuplement des sous-niveaux Zeeman les plus bas. On pourrait bien sûr utiliser aussi d'autres techniques comme l'action de gradients de champ sur des jets atomiques, mais toutes ces méthodes sont difficiles à mettre en œuvre. Il n'est pas facile de polariser une collection d'atomes.

La différence avec les photons est frappante. Les photons ont un moment cinétique étroitement lié à la polarisation de l'onde à laquelle ils sont associés. Par exemple, une onde lumineuse de polarisation circulaire droite correspond à des photons qui transportent une unité de moment cinétique le long de leur direction de propagation. Il suffit donc d'interposer sur le trajet d'un faisceau lumineux une plaque polarisante très simple à fabriquer pour obtenir après traversée de cette plaque un jet de photons possédant tous un moment cinétique bien défini.

Les méthodes optiques imaginées par Kastler et Brossel aux alentours de 1950, et développées depuis dans de nombreux laboratoires français et étrangers,

utilisent des échanges résonnants d'énergie et de moment cinétique entre atomes et photons polarisés pour transférer aux atomes une partie du moment cinétique que l'on sait si simplement introduire sur des photons. Lors de l'absorption résonnante d'un photon optique polarisé, l'atome gagne en effet non seulement l'énergie du photon, ce qui lui permet de passer du niveau fondamental A à un niveau excité B, mais également le moment cinétique que ce photon transporte. Lorsqu'il retombe ensuite dans l'état fondamental, l'atome ne reperd pas entièrement le moment cinétique acquis, car le photon réémis peut avoir plusieurs états de polarisation. Le bilan global du cycle de résonance optique, absorption puis réémission d'un photon, n'est donc pas nul. On utilise souvent pour décrire cet ensemble de processus l'image d'une « pompe optique » qui vide certains sous-niveaux Zeeman de A au profit d'autres en faisant passer intermédiairement les atomes par certains sous-niveaux de B. Même si elle fuit un peu, cette pompe est efficace puisqu'elle permet de concentrer jusqu'à 90 % des atomes dans certains sous-niveaux, que l'on peut d'ailleurs plus ou moins choisir en jouant sur la polarisation de l'onde incidente.

Les méthodes optiques fournissent, par ailleurs, un moyen très commode pour détecter la polarisation atomique qu'elles permettent de réaliser, ce qui est important si l'on veut utiliser ensuite ces atomes orientés pour étudier d'autres problèmes physiques. Les caractéristiques de la lumière absorbée ou émise par les atomes, comme par exemple l'intensité ou le taux de polarisation, dépendent en effet de la répartition des populations entre les divers sous-niveaux Zeeman de l'état fondamental ou excité. Il suffit donc d'observer cette lumière pour obtenir des informations précises

sur la polarisation atomique, pour suivre la manière dont elle se bâtit et évolue.

Donnons maintenant une idée des problèmes qui peuvent être abordés par ces méthodes.

On peut tout d'abord étudier le retour à l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire identifier et analyser les processus dits de relaxation thermique qui sont responsables de l'établissement de cet équilibre. Dans ce but, on commence par accumuler les atomes dans un sous-niveau Zeeman bien défini, puis on coupe brusquement le faisceau de pompage optique. Les populations s'égalisent alors sous l'effet des collisions que les atomes subissent entre eux ou contre les parois de l'enceinte qui les contient. Si l'on peut déterminer, grâce à un faisceau de détection, les constantes de temps avec lesquelles s'effectue ce retour à l'équilibre thermodynamique, on obtient des informations précieuses sur les processus de collision, on peut trancher entre plusieurs mécanismes possibles. De nombreux phénomènes ont pu ainsi être mis en évidence et étudiés de manière détaillée : par exemple, le fait qu'un atome ne rebondit pas élastiquement sur une paroi de verre, mais qu'il y reste adsorbé pendant un certain temps que l'on peut mesurer ; ou encore la formation de molécules krypton-rubidium lors d'une collision à trois corps entre deux atomes de krypton et un atome de rubidium...

Les méthodes optiques permettent également de déterminer avec une grande précision de faibles écarts énergétiques. Une fois que les atomes ont été accumulés dans un certain sous-niveau Zeeman A_1 , on peut en effet les faire passer dans un sous-niveau voisin A_2 en leur faisant absorber l'énergie correspondante sous forme d'un photon hertzien. La mesure de l'énergie

de ce photon, c'est-à-dire encore celle de la fréquence de l'onde hertzienne associée, fournit directement l'écart A_1 , A_2 . On reconnaît là le principe de la spectroscopie hertzienne. Ce que les méthodes optiques de la résonance magnétique apportent en plus, c'est la sensibilité. Au lieu de suivre, comme on le fait d'habitude, le passage des atomes de A_1 à A_2 par des procédés radioélectriques sensibles au nombre de photons hertiens qui disparaissent, on observe les photons optiques absorbés par les atomes et qui n'ont pas la même polarisation suivant que ces derniers se trouvent en A_1 ou A_2 . L'absorption d'un photon hertzien est donc détectée indirectement sur un photon optique qui peut transporter une énergie un milliard de fois plus grande et qui est par suite beaucoup plus facile à mettre en évidence. Cet accroissement de sensibilité permet d'opérer sur des vapeurs atomiques très diluées, et d'éviter les perturbations associées aux interactions présentes en milieu condensé.

On accède ainsi par ces mesures aux grandeurs caractéristiques de l'atome isolé : moments magnétiques, structures fine et hyperfine... avec une précision qui dans certains cas peut atteindre le dix millionième. Il devient également possible d'étudier de manière plus approfondie les interactions qui s'exercent entre des atomes et des photons incidents et de mettre en évidence des effets nouveaux. On a pu ainsi établir que de telles interactions peuvent avoir des conséquences observables, même si elles sont non résonnantes, c'est-à-dire même si l'énergie des photons incidents ne coïncide pas avec celle d'une transition atomique. Par exemple, une irradiation lumineuse non résonnante déplace les divers sous-niveaux Zeeman A_i de l'état fondamental d'une quantité proportionnelle à l'intensité lumi-

neuse et qui peut varier d'un sous-niveau à l'autre, ce qui se traduit par une modification des écarts hertziens $A_i A_j$; le faisceau de pompage optique, qui contient toujours en général des fréquences non résonnantes, perturbe donc les atomes qu'il permet d'orienter et de détecter. On trouve de même qu'une irradiation hertzienne non résonnante peut modifier un moment magnétique atomique, le rendre anisotrope, l'annuler même dans certains cas. Ces effets rappellent par certains côtés ceux de l'électrodynamique quantique, le déplacement de Lamb et l'anomalie du moment magnétique de l'électron par exemple. Ils suggèrent des images analogues, celles d'un atome absorbant virtuellement et réémettant aussitôt après les photons non résonnants qu'on envoie sur lui, « habillé » en quelque sorte par ces photons, et acquérant de ce fait des propriétés nouvelles. Il faut d'ailleurs bien voir que les atomes ne sont pas seuls à être affectés par ces processus : par exemple, la propagation du photon est stoppée pendant le court instant où il est virtuellement happé par l'atome ; on en déduit que la propagation de l'énergie lumineuse est ralentie dans un milieu transparent, c'est-à-dire dans un milieu formé d'atomes pour lesquels la lumière est non résonnante. Il s'agit là d'un phénomène bien connu, décrit habituellement au moyen d'un indice de réfraction.

Pour terminer cette rapide revue des tribulations que l'on peut faire subir à un atome grâce aux méthodes optiques, mentionnons enfin les expériences de pompage transversal où on le soumet à deux tentations en quelque sorte contradictoires : un champ magnétique parallèle à une certaine direction, qui favorise les états de moment cinétique bien défini par rapport à cette direction, un faisceau de pompage optique transversal, perpendiculaire au champ, qui tend à orienter les atomes le

long de cette nouvelle direction. Que vont faire les atomes dans de telles conditions? En champ nul, ils s'orientent le long du faisceau lumineux. Si l'on fait croître lentement le champ à partir de zéro, l'effet orientateur du faisceau lumineux est contrarié de plus en plus par le champ, pour disparaître complètement en champ suffisamment fort. On peut montrer effectivement que la variation avec le champ de l'orientation atomique ainsi obtenue donne naissance à des résonances centrées en champ nul et qui, dans certains cas, sont tellement fines qu'elles permettent de détecter des champs aussi faibles que le milliardième du champ terrestre, beaucoup plus petits même que le champ créé par le fonctionnement du cœur humain. Une telle expérience soulève d'ailleurs un problème beaucoup plus général, celui des superpositions linéaires d'états. En effet, un atome donné n'occupe pas forcément un sous-niveau d'énergie bien définie; il peut très bien se trouver dans ce qu'on appelle une superposition cohérente de sous-niveaux, avec des propriétés physiques qui ne résultent pas simplement de la juxtaposition des propriétés de chaque sous-niveau avec certains poids statistiques, mais qui font intervenir en plus des effets d'interférence, de la même manière qu'en optique ou en acoustique, l'intensité d'une onde obtenue par superposition de deux ondes élémentaires n'est pas simplement la somme des intensités des deux ondes. Ce sont les variations avec le champ statique de ces effets d'interférence qui expliquent les résonances en champ nul décrites plus haut, de même que plusieurs autres effets observés en physique atomique. On voit ainsi comment les concepts corpusculaires et ondulatoires se retrouvent étroitement mêlés au niveau quantique.

Abordons maintenant le problème des lasers et celui

de leur impact en physique atomique et moléculaire. Pour cela, il nous faut tout d'abord analyser une autre propriété des interactions entre atomes et photons, qui est à la base du fonctionnement de ces instruments. Partons d'un atome qui a été porté d'une manière ou d'une autre dans un niveau excité B. S'il est isolé, il retombe en général au bout d'un certain temps dans un niveau inférieur A en émettant spontanément un photon qui peut avoir plusieurs directions de propagation et plusieurs états de polarisation différents. Supposons maintenant que cet atome, dans l'état B, soit de plus irradié par N photons tous identiques et résonnants pour la transition BA. Au processus d'émission spontanée décrit précédemment se superpose un nouveau processus dit d'émission induite ou stimulée : les N photons incidents stimulent en effet l'atome à émettre un photon en tous points identique à eux-mêmes, ayant même énergie, même direction de propagation, même polarisation, et ceci d'autant plus efficacement qu'ils sont plus nombreux. Voilà qui révèle une propriété fondamentale des photons, et plus généralement des bosons, leur tendance un peu grégaire à se regrouper au maximum dans le même état quantique, alors qu'à l'opposé les électrons, et plus généralement les fermions, manifestent un individualisme farouche qui les fait s'exclure mutuellement.

Considérons alors un milieu atomique dans lequel on a réalisé ce qu'on appelle une inversion de populations, c'est-à-dire un milieu où la proportion d'atomes occupant le niveau supérieur B est plus grande que celle relative au niveau inférieur A. Le pompage optique décrit plus haut nous a déjà familiarisés avec de telles situations, visiblement hors de l'équilibre thermodynamique. Envoyons sur ce milieu un photon résonnant

pour la transition BA. Ce photon a plus de chances de stimuler l'émission par un atome excité d'un deuxième photon identique à lui-même que d'être absorbé par un atome dans l'état A. On obtient ainsi deux photons qui, à leur tour, peuvent stimuler l'émission d'un troisième avec une efficacité deux fois plus grande, et ainsi de suite... Un tel processus de multiplication est limité par le temps que met la lumière à traverser le milieu atomique amplificateur. On peut facilement augmenter ce temps en enfermant les atomes entre deux miroirs parallèles. Si les photons se propagent perpendiculairement aux miroirs, ils effectuent alors de nombreux allers et retours et peuvent interagir plus longtemps avec les atomes, pourvu toutefois que la distance entre les deux miroirs soit convenablement choisie, de manière à éviter une interférence destructive entre les ondes lumineuses. Il n'est d'ailleurs pas nécessaire d'envoyer des photons de l'extérieur et le système peut fonctionner en oscillateur plutôt qu'en amplificateur : l'émission spontanée par les atomes excités fournit en effet les photons initiaux qui peuvent déclencher le processus de multiplication. Si le gain du milieu est supérieur aux pertes, provenant par exemple de la mauvaise qualité des miroirs ou de la diffraction, et si l'on réussit à maintenir en permanence l'inversion de populations entre les niveaux A et B grâce à un dispositif de pompage approprié, on obtient une source de photons d'énergie et de direction de propagation très bien définies : c'est le laser.

L'image que nous venons d'en donner est bien sûr très schématique et très qualitative. La mise au point des lasers a posé de nombreux problèmes aux physiciens et a ainsi stimulé très efficacement certaines recherches en physique atomique et moléculaire. Il a fallu par

exemple imaginer des mécanismes de peuplement et de dépeuplement sélectifs de niveaux d'énergie susceptibles de conduire à des inversions de population, et pour cela analyser des processus d'excitation très divers, tels que transferts radiatifs et non radiatifs, collisions avec des électrons, échanges d'énergie entre atomes distincts, réactions chimiques... Les systèmes étudiés n'ont pas été seulement des atomes en phase gazeuse, mais aussi des molécules, des ions, des semi-conducteurs, des cristaux isolants, des colorants liquides... Il a fallu également préciser notre description du champ électromagnétique, et opérer la synthèse entre le langage ondulatoire employé ordinairement par les opticiens et les électroniciens et le langage corpusculaire avec lequel les physiciens des hautes énergies parlent généralement des photons γ . Divers types d'états quantiques ont été introduits pour décrire le rayonnement sortant d'un laser, pour analyser les propriétés statistiques d'un faisceau lumineux, pour interpréter plus simplement les expériences de coïncidence de photons. Le fonctionnement même du laser est un problème complexe de physique atomique, de mécanique quantique et de mécanique statistique. Comment calculer exactement le phénomène d'accrochage, la largeur et la forme de la raie émise, la dispersion angulaire du faisceau, la compétition entre les divers modes propres de la cavité définie par les deux miroirs, l'effet du mouvement d'agitation thermique des atomes? Plusieurs modèles théoriques ont dû être développés et ont montré la puissance et la richesse des équations de base sur lesquelles ils reposent tous : l'équation de Schrödinger et les équations de Maxwell.

Il importe enfin de réaliser que l'intérêt des lasers n'est pas seulement d'attirer l'attention sur les pro-

blèmes de physique posés par leur fonctionnement. Ce sont également des sources lumineuses aux propriétés tout à fait originales et on les considère de plus en plus comme de nouveaux outils permettant de défricher et d'explorer de nouveaux domaines de recherche.

Une première caractéristique intéressante de ces sources est leur puissance instantanée, qui peut être très élevée et dépasser par plusieurs ordres de grandeur celle des sources usuelles. Il devient ainsi possible de soumettre les électrons d'un atome à des champs électromagnétiques comparables et même supérieurs à ceux qui les maintiennent liés au noyau. Le comportement de l'atome n'est alors plus le même qu'aux faibles intensités, et des phénomènes nouveaux apparaissent. Par exemple, un faisceau de lumière rouge issu d'un laser à rubis et tombant sur un cristal de quartz donne naissance à un faisceau de lumière ultraviolette ; l'explication d'une telle transformation est qu'un atome du cristal devient capable aux fortes intensités de convertir deux photons rouges qui arrivent sur lui en un seul photon ultraviolet d'énergie deux fois plus grande. De nombreux autres effets non linéaires analogues au précédent sont maintenant étudiés dans le cadre d'une nouvelle branche de l'optique, l'optique non linéaire : addition et soustraction de fréquences, absorption simultanée de plusieurs photons, effet Raman stimulé, autofocalisation de la lumière dans un milieu non linéaire dont l'indice varie avec l'intensité. Le perfectionnement des lasers de puissance permet actuellement d'atteindre la région des 10^{12} watts. Pour avoir une idée de ce que représente une telle puissance, on peut considérer une lampe de 100 watts qui suffit largement à éclairer une pièce le soir, et imaginer qu'on réunisse dix milliards de telles lampes et qu'on concentre

la lumière qu'elles émettent dans un pinceau tellement étroit, qu'arrivant sur la lune, il donnerait une tache dont le rayon serait seulement de quelques kilomètres. Évidemment, une telle puissance, qui correspond en fait à celle de l'ensemble de toutes les centrales électriques du monde, ne peut être maintenue très longtemps ; le laser ne peut fournir dans ces conditions qu'un éclair très bref. Cela m'amène à considérer une autre caractéristique intéressante de ces sources, leur possibilité de fonctionner par impulsions.

On peut en effet utiliser de telles impulsions pour exciter de manière très brève un atome ou une molécule, et étudier ensuite l'évolution ultérieure du système lorsqu'il est abandonné à lui-même. Par exemple, si une impulsion laser a porté un ensemble d'atomes dans une superposition cohérente de deux niveaux excités rapprochés, la lumière qu'ils réémettent ensuite spontanément est modulée à une fréquence qui correspond à l'écart entre ces deux niveaux. L'observation de ces battements quantiques constitue une nouvelle méthode d'étude spectroscopique. On peut également utiliser l'impulsion lumineuse pour exciter un niveau moléculaire bien défini, puis étudier la manière dont cette énergie se transfère ensuite aux autres degrés de liberté de la molécule, ou à une molécule voisine. On accède ainsi directement à la cinétique des processus atomiques et intramoléculaires. Plus ces processus sont rapides, plus l'impulsion excitatrice doit être brève. On arrive maintenant à réaliser des impulsions de 10^{-12} seconde, ce qui permet d'aborder des études de relaxation en milieu condensé, où les constantes de temps sont très courtes.

Les sources lasers présentent encore d'autres caractéristiques qui les rendent intéressantes pour la physique

atomique et moléculaire : il s'agit essentiellement de la monochromaticité et de la stabilité en fréquence, ainsi que de la possibilité récemment offerte par les lasers à colorants de balayer cette fréquence sur une plage étendue.

Considérons par exemple les spectres moléculaires. Leur complexité tient au très grand nombre de niveaux que les molécules possèdent du fait de leurs degrés de liberté supplémentaires de vibration et de rotation. L'interprétation de ces spectres est considérablement simplifiée si l'on arrive à exciter sélectivement un seul niveau d'énergie de manière à obtenir seulement les raies émises à partir de ce niveau. On peut également étudier la variation systématique d'un niveau à l'autre de grandeurs physiques telles que durée de vie, moment magnétique..., ce qui apporte des renseignements précis sur la structure et les couplages internes de la molécule. Une autre application intéressante concerne l'étude de l'élargissement Doppler et la mise en évidence d'effets non-linéaires permettant de s'en affranchir. Envoyons en effet sur un gaz d'atomes ou de molécules deux ondes monochromatiques de même fréquence et se propageant en sens inverse, l'une très intense qui perturbe les atomes, l'autre très faible qui les sonde. L'onde intense n'est absorbée que par certains atomes seulement, ceux dont l'effet Doppler est tel qu'il leur permet d'entrer en résonance avec elle. Tous ces atomes sont caractérisés par une même vitesse de déplacement le long de la direction de l'onde intense. L'onde sonde, qui se propage en sens inverse, détecte par contre une autre classe d'atomes, ceux qui se propagent avec la même vitesse mais dans la direction opposée. Les deux ondes n'interagissent donc pas avec les mêmes atomes, sauf si leur fréquence commune est telle qu'elle nécessite

un effet Doppler nul, auquel cas les atomes concernés sont ceux qui se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation des deux ondes. Balayons alors la fréquence commune des deux ondes. On obtiendra sur l'absorption de l'onde sonde un profil Doppler large caractérisant la distribution de vitesse des atomes absorbants et, au centre de ce profil Doppler, un pic beaucoup plus étroit, traduisant le fait que pour cette fréquence, et seulement cette fréquence, l'onde sonde détecte des atomes qui sont de plus perturbés par l'onde intense. On peut utiliser ce pic étroit, dit d'absorption saturée, pour stabiliser la fréquence d'un laser, pour la verrouiller au centre d'une raie atomique avec une précision beaucoup plus grande que si l'on utilisait le seul profil Doppler. On atteint ainsi des stabilités et des reproductibilités de fréquence supérieures à 10^{-11} . Une telle performance, transposée dans le domaine des longueurs, reviendrait à fixer une distance de l'ordre de celle qui sépare la terre de la lune avec une précision de l'ordre du millimètre. On imagine aisément les progrès que de telles méthodes vont faire réaliser à la spectroscopie optique, aux standards de fréquence.

* * *

Pour terminer ce rapide survol des grands courants qui animent la physique atomique et moléculaire, je voudrais maintenant évoquer une autre caractéristique importante de cette discipline, son ouverture vers les autres branches de la physique, vers d'autres sciences comme la chimie, la biologie...

Cette ouverture se traduit tout d'abord par un échange croissant d'idées et de techniques expérimentales. Il

devient par exemple de plus en plus courant de voir des expériences de physique atomique utiliser des accélérateurs d'ions, des dispositifs de coïncidence, des échelles de comptage, et ressembler ainsi de plus en plus à des expériences de physique nucléaire ; réciproquement, le physicien atomiste et moléculaire, en utilisant le rayonnement émis par des particules chargées tournant dans un synchrotron, élargit considérablement le domaine d'application de ces instruments. Un autre exemple important, qui illustre bien ce nouvel état d'esprit, est celui des collisions entre jets atomiques. Pour étudier en détail les interactions entre atomes, molécules, ions, électrons, le physicien atomiste et moléculaire n'hésite plus maintenant à envoyer l'une sur l'autre de telles particules après leur avoir communiqué une énergie et une vitesse bien définies ; il analyse ensuite les particules diffusées, issues de la réaction, mesure leur énergie et leur répartition angulaire, détermine la variation des diverses sections efficaces en fonction de l'énergie des particules incidentes. De telles études sont beaucoup plus complexes que celles de la même réaction en phase gazeuse ou liquide, qui ne peuvent fournir que des renseignements globaux ; elles permettent de préciser le mécanisme intime de la réaction, les états intermédiaires importants, les diverses courbes de potentiel que le système suit pour passer de la voie d'entrée à la voie de sortie. On peut encore mentionner l'apport récent des lasers à d'autres domaines, comme la microchirurgie pour le traitement des décollements de la rétine par exemple, ou la biologie, pour l'étude des vitesses de réaction, des mouvements de vibration et de torsion des macromolécules et membranes biologiques ; on étudie dans ce dernier cas la répartition angulaire et spectrale du rayonnement

laser diffusé, dont la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que les dimensions des objets étudiés.

Plus important encore que cet échange d'idées et de techniques me paraît peut-être le fait que la physique atomique et moléculaire trouve, grâce à ces contacts pluridisciplinaires, de nouvelles motivations d'étude. Les progrès dans les autres branches de la science se traduisent en effet par un besoin accru d'informations et de données sur les très nombreux processus atomiques et moléculaires sous-jacents aux phénomènes observés, et le physicien atomiste et moléculaire est constamment sollicité pour fournir ces informations et ces données.

Par exemple, l'interprétation du rayonnement X et ultraviolet émis par les étoiles pose toute une série de nouveaux problèmes : il faut déterminer les niveaux d'énergie et les forces d'oscillateur d'atomes très ionisés, trouver parmi plusieurs modes de désexcitation radiative d'ions métastables celui qui est prépondérant, comprendre comment des ions H^- sont formés par capture d'électrons autour d'atomes d'hydrogène, puis détruits par photodétachement... On peut encore citer la récente découverte dans l'espace interstellaire de plusieurs dizaines d'espèces moléculaires que les radio-astronomes ont pu détecter et identifier grâce au rayonnement microonde et hertzien qu'elles émettent ou absorbent. On reste sidéré devant la complexité de ces molécules qui peuvent comprendre jusqu'à huit atomes. Comment se forment-elles? Lors de collisions entre atomes ou par réaction catalytique à la surface des grains de poussière qui existent dans l'espace? Certaines émissions, comme celles du radical OH, ont une brillance, une finesse de raie, une directivité telles que seul un effet maser pourrait les expliquer. Quels sont alors les processus radiatifs ou collisionnels susceptibles de

produire l'inversion de population correspondante?

Je ne voudrais pas poursuivre plus avant cette longue énumération de problèmes par crainte de vous ennuyer. J'espère cependant vous avoir convaincu de la vitalité actuelle de la physique atomique et moléculaire et de ses multiples facettes. Si l'on excepte les réactions nucléaires qui sont à l'origine de l'énergie émise par les étoiles, on peut dire que les atomes, les molécules, les ions et les électrons sont au centre de tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques de notre univers. Aussi me permettez-vous peut-être de reprendre cette image que Feynman donne au tout début de son célèbre cours de physique. Imaginons que dans un cataclysme toute notre connaissance scientifique soit détruite et qu'une seule phrase puisse passer aux générations futures ; quel message devrait alors contenir la bouteille que l'on jetterait à la mer ? Ce serait, je crois, que toute chose est formée d'atomes.

* * *

Je voudrais enfin, pour conclure, mentionner un dernier point auquel je suis personnellement très sensible. Malgré la sophistication croissante des techniques expérimentales, la physique atomique et moléculaire se prête encore à la constitution de petites équipes de recherche, réalisant des expériences à l'échelle humaine, étudiant à la fois l'aspect théorique et expérimental des problèmes abordés. A une époque où la spécialisation des tâches s'accroît de plus en plus, où les problèmes de gestion et d'administration absorbent une proportion croissante d'un temps précieux, cette possibilité de travailler en petites équipes me paraît un facteur essentiel d'équilibre, permettant de conserver

la disponibilité et l'ouverture d'esprit si indispensables à la recherche.

C'est dans une petite équipe de ce genre que j'ai eu la chance de faire mon apprentissage de la recherche, et je ne saurais assez exprimer toute la reconnaissance que j'éprouve à l'égard des deux hommes qui m'ont fait découvrir et aimer la physique, Alfred Kastler et Jean Brossel. Leur laboratoire, que je rejoignis en septembre 1955 pour y effectuer mon diplôme d'études supérieures, puis ma thèse d'État, et que je ne devais plus quitter par la suite, ne comportait à l'époque que six ou sept chercheurs, mais il y régnait une ambiance exceptionnelle. Un thème de recherches d'une grande simplicité et d'une grande élégance venait d'être dégagé. De nombreuses idées d'expérience germaient et étaient discutées passionnément. Je garde un souvenir particulier de cette période de mon existence où, dégagé de tout souci matériel grâce à une bourse du C. N. R. S., je pus consacrer tout mon temps à l'étude approfondie d'un problème de physique, apprenant à concevoir et à réaliser une expérience, à bâtir un modèle théorique, à dégager la signification physique d'un calcul, à rédiger un article scientifique. Plus précieux encore que les résultats obtenus me paraît l'enrichissement personnel que j'ai pu tirer de tels contacts humains. J'ai mieux compris grâce à eux ce que signifiaient la modestie, la passion de la vérité, l'esprit de tolérance, le respect d'autrui.

Nous sommes tous marqués par les enseignants que nous avons eus. Je me souviens toujours de certains de mes professeurs de lycée et de l'intérêt constant porté par mes parents à mes études. C'est un cours de Kastler donné aux élèves de l'École Normale Supérieure qui m'attira vers la physique atomique. Je n'oublie pas

non plus l'enseignement de physique moderne dispensé à l'école des Houches et à Saclay à une époque où le troisième cycle n'avait pas encore fait son apparition dans les Facultés, ni certains cours et séminaires du Collège de France, en particulier les vôtres, mon cher Abragam, qui nous dévoilaient les mystères de la résonance magnétique, de l'effet Mössbauer, ou de la relaxation thermique... Vous avez, dès le début, marqué de l'intérêt pour mes travaux et c'est vous qui êtes à l'origine de ma venue au Collège de France. Vous savez à quel point je vous en suis reconnaissant.

Depuis une dizaine d'années, j'ai eu à mon tour à assurer divers enseignements en Faculté, au niveau soit du troisième cycle, soit de la maîtrise de physique. J'ai pu ainsi constituer autour de moi une petite équipe de jeunes chercheurs et découvrir cet autre aspect passionnant de notre métier, l'initiation à la recherche. Je voudrais aujourd'hui dire à tous les membres de cette équipe combien j'ai été heureux de pouvoir travailler avec eux, et combien leur amitié m'est précieuse. Tout ce que nous avons réalisé ensemble est le fruit d'un travail collectif et représente bien plus qu'une somme de contributions individuelles. Je souhaite de tout cœur que nous puissions encore longtemps poursuivre cette collaboration étroite et amicale.

A la veille d'entreprendre ce nouvel enseignement, deux soucis essentiels m'animent : tout d'abord, celui de conserver le contact avec un public d'étudiants et de chercheurs débutants qui incitent l'enseignant à formuler des idées directrices claires et simples, à se renouveler sans trop se spécialiser ; ensuite, celui de parvenir, grâce aux séminaires notamment, à susciter des contacts fructueux entre laboratoires, à donner une image aussi fidèle que possible de la physique qui

se fait, avec ses imperfections, ses espoirs, ses succès, ses échecs.

Mes chers collègues, je ne sais si je serais capable de mener à bien un tel programme. Il m'arrive très fréquemment d'en douter. Je puis cependant vous assurer que je m'y consacrerai de mon mieux, fort que je suis de la confiance que vous avez bien voulu me témoigner.