

Quelques réflexions sur l'activité de recherche

par Claude COHEN-TANNOUDJI
Professeur au Collège de France

Lorsque Jacqueline TINNÈS m'a demandé d'écrire un article pour ce numéro spécial du Bulletin de l'Union des Physiciens, fêtant le 90^e anniversaire de la parution du premier numéro, j'ai tout d'abord envisagé un texte qui décrirait quelques développements récents dans mon domaine de recherches actuel, celui du refroidissement et du piégeage laser des atomes*. Puis, il nous a semblé qu'il serait peut-être plus intéressant d'élargir un peu le débat et de présenter quelques réflexions sur l'activité de recherche. A la lumière de mon expérience personnelle, je voudrais tout d'abord essayer de donner une idée de l'activité d'un laboratoire, des grandes tendances d'évolution d'un domaine de recherche. Je voudrais également souligner ce qui me semble important dans la formation intellectuelle que la pratique de la recherche permet d'acquérir et de développer. Je voudrais ainsi donner à mes collègues de l'enseignement secondaire, qui jouent un rôle si important pour l'orientation de leurs jeunes élèves, des arguments en faveur de la recherche fondamentale, avec l'espoir qu'ils pourront ainsi susciter des vocations de chercheurs. Le texte de cet article est d'ailleurs très proche de celui d'une conférence que j'avais présentée il y a deux ans lors d'un colloque célébrant le Bicentenaire de l'École Normale Supérieure. J'essayais là aussi de souligner le rôle important que jouent les Grands Collèges Européens pour le développement de la culture scientifique des nouvelles générations.

La première partie de cet exposé sera consacrée à un bref survol des recherches sur les interactions matière-rayonnement, qui ont été au centre de mes préoccupations au cours des trente-cinq dernières années.

Les assemblages de particules chargées que sont les atomes et les molécules émettent et absorbent des ondes électromagnétiques dont les fréquences couvrent un large domaine spectral qui s'étend des ondes radio aux rayons γ . Comprendre les interactions électromagnétiques qui sont à l'origine de cette émission de lumière a toujours été une préoccupation essentielle de la physique. Par exemple, c'est pour expliquer le caractère discret des fréquences lumineuses émises par un atome que Bohr, Heisenberg, de Broglie, Schrödinger, Dirac ont été amenés à introduire une nouvelle

* Voir BUP.

mécanique, la mécanique quantique qui a transformé notre représentation du monde microscopique. L'étude, de plus en plus précise, des propriétés de la lumière émise et absorbée par les atomes et les molécules est devenue ainsi une source essentielle d'informations sur la structure et la dynamique de ces systèmes.

C'est ce domaine de la physique que j'ai vu progressivement se transformer depuis la fin des années 50, période au cours de laquelle j'effectuais ma thèse de doctorat dans l'équipe d'Alfred Kastler et Jean Brossel au laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure. J'ai eu la chance d'être initié à la recherche par deux physiciens hors pair qui venaient d'imaginer une nouvelle méthode d'investigation de la structure des atomes. Le principe de cette méthode, appelée pompage optique, est très schématiquement le suivant. Les atomes, dans leur état fondamental ou dans leurs états excités, ont un moment cinétique intrinsèque : ils tournent sur eux-mêmes comme de petites toupies. A l'équilibre thermodynamique, les axes autour desquels tournent ces petites toupies sont orientés au hasard. Autant d'atomes tournent dans un sens que dans l'autre. L'idée du pompage optique est de faire interagir de tels atomes non polarisés avec de la lumière résonnante et polarisée. Les échanges de moment cinétique qui s'effectuent entre atomes et lumière lors des processus élémentaires d'absorption et d'émission de photons permettent alors de transférer aux atomes initialement non polarisés le moment cinétique transporté par les photons polarisés. Les atomes se mettent tous à tourner dans le même sens. Leurs moments magnétiques pointent tous dans la même direction. On réalise ainsi simplement une situation hors d'équilibre, ouvrant la voie à toute une série d'études nouvelles. Il n'est pas question ici d'entrer dans le détail de toutes ces études. Laissez-moi simplement noter que la démarche à la base du pompage optique représente une nouvelle manière d'envisager les interactions matière-rayonnement. Au lieu de les considérer comme une source d'informations sur les atomes, en adoptant un point de vue qui pourrait être qualifié de passif, on les utilise ici de manière active, pour agir sur les atomes et contrôler leur moment cinétique.

J'en viens maintenant à l'état actuel des recherches sur les interactions matière rayonnement. A première vue, la comparaison avec la situation que j'ai connue au début de ma carrière de chercheur suggère l'idée d'un éclatement total du domaine de recherches. Sur le plan instrumental tout d'abord. Les sources laser ont envahi les laboratoires, améliorant par plusieurs ordres de grandeur les performances des sources de lumière, évoluant d'année en année vers des formes plus sophistiquées, comme les lasers terrawatts ou femtosecondes, ou plus compactes et plus commodes à utiliser comme les diodes laser. L'informatique s'est imposée dans tous les secteurs de l'activité d'un laboratoire, que ce soit dans le contrôle d'une expérience et la prise des données, dans le traitement, l'analyse et l'interprétation de ces données, dans l'édition des textes scientifiques. Des remarques analogues pourraient être faites à propos du développement des détecteurs de rayonnement, des techniques d'ultravide, de cryogé-

nie. Pour rester présent dans la compétition internationale, un laboratoire doit constamment renouveler son parc instrumental et ses moyens d'études, ce qui n'est pas sans poser de redoutables problèmes de financement et de recyclage des personnels.

Parallèlement à ce développement instrumental, on assiste également à un foisonnement de nouveaux thèmes de recherche comme l'optique non-linéaire, l'ionisation multiphotonique des atomes, le refroidissement laser, l'électrodynamique quantique en cavité, les états comprimés de la lumière et la réduction du bruit quantique, la non-démolition quantique, etc. Il me serait impossible ici de les passer en revue, et même simplement de les citer tous. Laissez-moi juste vous dire que dans certaines conférences internationales consacrées à un domaine de recherches, on peut avoir jusqu'à dix sessions parallèles traitant de thèmes différents, plongeant dans l'embarras ceux qui voudraient écouter deux ou trois communications intéressantes présentées au même horaire. Que dire également des publications scientifiques dont le nombre croît de manière anarchique et dont le contenu devient parfois si technique qu'il n'est plus accessible qu'à un petit nombre d'experts ?

Mais, me direz vous alors, comment ne pas crouler sous cette masse de données nouvelles, comment ne pas se retrouver enfermé dans un domaine de plus en plus étroit, comment conserver un certain recul par rapport aux problèmes étudiés ? Fort heureusement, il existe, me semble-t-il, un deuxième trait marquant dans l'évolution de la physique qui autorise un certain optimisme. L'éclatement des domaines de recherches s'accompagne d'une tendance à l'unification des concepts, d'une recherche de comportements universels qui permettent des rapprochements fructueux entre des phénomènes qui paraissaient à première vue complètement différents.

Par exemple, et pour la première fois en physique, on entrevoit la possibilité d'une description théorique unifiée des diverses interactions connues. Le grand rêve d'unification d'Einstein ne semble plus tout à fait utopique. Ainsi, on dispose maintenant d'un même cadre théorique pour décrire des phénomènes aussi divers que le magnétisme, les interactions électromagnétiques responsables de la cohésion des atomes et les interactions faibles responsables de la radioactivité bêta. Cette unification des interactions faibles et électromagnétiques a conduit à l'idée que la symétrie de réflexion d'espace ne devait pas être parfaite en physique atomique. Effectivement, des expériences suffisamment précises ont permis de mettre en évidence une violation de la parité dans les atomes, ce qui veut dire que l'étude de l'émission et de l'absorption de lumière par un atome permet de donner un sens absolu, et non plus seulement relatif, aux notions de droite et de gauche.

Un autre exemple que je pourrais donner est celui des échanges conceptuels fructueux qui s'établissent entre mécanique quantique et mécanique statistique des

phénomènes irréversibles et qui permettent un éclairage nouveau sur des phénomènes aussi fondamentaux que l'émission spontanée de rayonnement par un atome excité. Il en est résulté une meilleure compréhension du rôle des fluctuations quantiques du champ de rayonnement, de la manière dont l'émission spontanée peut être modifiée lorsque l'atome est enfermé dans une cavité. Récemment, des développements expérimentaux ont permis de piéger un ion unique et d'observer à l'œil nu la lumière de fluorescence qu'émet cet ion quand il est excité par un faisceau laser résonnant. Dans certaines conditions, on observe que cette lumière de fluorescence s'établit et s'arrête de manière erratique, ce qui met en évidence des sauts quantiques effectués par l'atome, à des instants aléatoires, entre un niveau d'énergie à partir duquel il peut émettre de la lumière de fluorescence, et un autre niveau à partir duquel il n'en émet pas. L'interprétation de ces expériences a suscité de nombreuses réflexions sur les prédictions de la mécanique quantique concernant l'évolution d'un système quantique unique, soumis à des processus dissipatifs. Elles ont débouché sur de nouvelles descriptions théoriques, basées sur des simulations Monte-Carlo quantiques de l'évolution du système, qui, non seulement apportent un éclairage nouveau sur la description quantique des processus dissipatifs, mais se révèlent aussi plus performantes sur le plan numérique.

Le dernier exemple que je donnerai de travaux qui débouchent sur des rapprochements fructueux entre domaines différents concerne le refroidissement laser des atomes, problème sur lequel travaille actuellement mon équipe de recherches. Comme dans les expériences de pompage optique, les interactions matière-rayonnement sont utilisées ici pour agir sur les atomes. On utilise les échanges de quantité de mouvement entre photons et atomes pour contrôler au moyen de faisceaux laser la vitesse de déplacement d'un atome. Le piégeage des atomes est également possible au moyen de configurations appropriées de faisceaux laser et de champs magnétiques. Plusieurs mécanismes nouveaux de refroidissement ont été découverts. Nous avons ainsi baptisé l'un d'entre eux du nom d'«effet Sisyphe» car il consiste à faire évoluer l'atome dans une série de collines et de vallées de potentiel créées par l'onde lumineuse et à utiliser les absorptions et émissions de photons pour replacer l'atome au fond d'une vallée dès qu'il a atteint le sommet d'une colline. Le pauvre atome se retrouve ainsi dans la situation du héros de la mythologie grecque et voit progressivement décroître son énergie cinétique initiale. Un autre mécanisme de refroidissement est basé sur un filtrage des atomes dans l'espace des vitesses grâce à des effets d'interférence quantique qui bloquent l'absorption de photons pour des atomes de vitesse quasi nulle. Ces atomes très lents sont ainsi protégés de l'échauffement lié au recul aléatoire que leur communiqueraient les photons qui seraient réémis spontanément si l'absorption n'était pas bloquée. Un tel mécanisme permet d'abaisser l'énergie cinétique des atomes au-dessous de l'énergie de recul associée à l'émission ou l'absorption d'un seul photon. Pour comprendre quantitativement les limites ultimes et l'efficacité du refroidissement,

plusieurs concepts ont dû être empruntés à d'autres domaines de la physique et adaptés à ce nouveau type de problème. L'analogie entre le mouvement de l'atome dans l'onde laser et le mouvement brownien bien connu en physique statistique suggère d'introduire les notions de friction et de diffusion d'impulsion pour décrire la compétition entre les processus de refroidissement et d'échauffement. Ces notions se révèlent effectivement très utiles mais elles doivent être adaptées car, lorsque les limites quantiques sont atteintes, il n'est plus possible, à cause des relations d'incertitude de la mécanique quantique, de considérer un atome en un point donné avec une impulsion donnée. Le problème qui se pose est alors celui d'un mouvement brownien quantique. Par ailleurs, les caractéristiques de la marche au hasard de l'impulsion de l'atome peuvent revêtir un caractère tout à fait original. Dans certaines expériences de refroidissement laser, la diffusion peut même devenir tout à fait anormale, et son aspect temporel entièrement dominé par des événements rares.

Notons enfin que lorsque les atomes deviennent très froids, leur vitesse devient très faible, de l'ordre du centimètre ou du millimètre par seconde, alors qu'aux températures ambiantes, elle est de l'ordre du kilomètre par seconde. La longueur d'onde de de Broglie des atomes, qui est inversement proportionnelle à leur vitesse, devient importante et l'aspect ondulatoire du mouvement des atomes ne peut plus alors être ignoré. Une nouvelle optique est donc en train de naître, où les ondes lumineuses sont remplacées par les ondes de de Broglie associées à des atomes. De nouveaux dispositifs sont imaginés pour réaliser des miroirs, des lames séparatrices, des interféromètres pour ondes de de Broglie. Comme les atomes se propagent beaucoup plus lentement que les photons à l'intérieur de l'interféromètre, des gains de sensibilité considérables sont attendus. De plus, pour des densités suffisamment élevées, on commence à observer des effets de statistique quantique, comme la condensation de Bose-Einstein, une proportion importante des atomes venant se condenser dans le même état quantique.

Avec ces divers exemples, j'espère ainsi vous avoir donné une idée de l'évolution présente de l'activité de recherches : un développement spectaculaire des techniques et des moyens d'investigation, un foisonnement de nouveaux thèmes de recherches, accompagnés de grandes synthèses, de l'émergence de concepts unificateurs, de rapprochements fructueux entre domaines différents. Notre compréhension des phénomènes évolue sans cesse. Chaque nouvelle découverte ouvre des horizons nouveaux et pose des problèmes nouveaux. C'est en ce sens, par le renouvellement constant de la vision qu'il nous donne du monde qui nous entoure, que le savoir acquis par la recherche peut être qualifié de vivant.

Il y a un aspect de la recherche que je n'ai pas évoqué ici et vous en êtes peut-être un peu surpris. C'est celui des applications. Il est clair que le développement du savoir

augmente la capacité de maîtriser les phénomènes naturels, d'en créer de nouveaux, de répondre aux besoins vitaux et essentiels de l'humanité. Il s'agit là d'une évidence qui s'impose d'elle-même. Je ne crois pas cependant que la perspective des applications soit le moteur essentiel à la base du développement du savoir. Ce qui stimule le chercheur dans son travail, c'est la soif de comprendre, le plaisir intense d'identifier un mécanisme, de voir confirmée une hypothèse, d'établir de nouvelles correspondances entre des phénomènes différents, en un mot de rendre le monde plus intelligible. Toute nouvelle conquête du savoir se traduit en général, à plus ou moins long terme, par de nouvelles applications, mais le plus souvent on était très loin d'imaginer de telles applications au moment des recherches conduisant à ces découvertes. Laissez-moi vous donner un exemple. J'assistais en 1963 à l'un de mes premiers grands congrès scientifiques, le congrès d'électronique quantique, qui se tenait à Paris. Le premier laser à rubis venait d'être réalisé quelques années auparavant par Maiman, ainsi que le premier laser à gaz par Javan. Les physiciens se passionnaient pour les caractéristiques de ces nouvelles sources lumineuses, leur cohérence, leur pureté spectrale, leur flux élevé de photons. Ils discutaient des nouveaux processus physiques que ces sources permettraient d'étudier, comme les processus multiphotoniques ou la génération d'harmoniques. Mais l'opinion générale, et qui était partagée par des physiciens éminents que je respecte beaucoup, était qu'il s'agissait là d'un outil merveilleux, d'un jouet pour ainsi dire, qui allait occuper les chercheurs pendant de nombreuses années, mais qui ne sortirait jamais de leurs laboratoires ! Qui aurait imaginé à cette époque l'énorme impact que les lasers allaient avoir sur le plan industriel et économique ? Nous savons tous maintenant que les télécommunications sont réalisées de plus en plus par des rayonnements laser se propageant dans des fibres optiques. Nous utilisons tous des disques laser. Nous savons que les lasers sont couramment utilisés en ophtalmologie, en chirurgie, en traitement des matériaux, en téléométrie. J'arrête ici cette longue énumération qu'il serait fastidieux de poursuivre. Il est bien clair que tous ces développements n'étaient pas présents à l'esprit des physiciens qui d'Einstein à Townes en passant par Kastler allaient introduire les concepts fondamentaux d'émission induite de rayonnement, d'inversion de populations atomiques, d'amplification de lumière par émission induite dans un milieu inversé, qui sont à la base du fonctionnement des lasers.

La remarque précédente ne signifie pas bien sûr que les chercheurs ne s'intéressent pas aux retombées possibles de leurs travaux. Bien au contraire. La préoccupation de trouver une utilisation intéressante des découvertes est de plus en plus présente dans les laboratoires et l'image traditionnelle du savant vivant dans sa tour d'ivoire est tout à fait dépassée. Revenons par exemple à la physique des atomes froids que j'évoquais il y a quelques minutes. Comme les atomes se déplacent à des vitesses très faibles, on peut les observer pendant des temps T très longs et la largeur des résonances observables sur ces atomes devient très faible car elle est inversement proportionnelle

à T . La précision avec laquelle un oscillateur peut être verrouillé sur une fréquence atomique peut donc être considérablement augmentée, ce qui suggère de réaliser un nouveau type d'horloges atomiques utilisant des atomes refroidis par laser. Qui plus est, pour éviter que ces atomes ne s'accélèrent, en tombant tout simplement dans le champ de pesanteur, l'idée la plus simple consiste à effectuer l'expérience en micro-gravité, dans un satellite. Tout en poursuivant ses recherches fondamentales, notre équipe est ainsi engagée depuis quelques années dans une collaboration avec le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences, à l'Observatoire de Paris, et avec le Centre National d'Études Spatiales pour réaliser une nouvelle horloge atomique à atomes froids. Des séries de tests ont déjà été effectuées dans une caravelle effectuant des séries de périodes de vol parabolique en chute libre, pour tester la stabilité des composants optiques utilisés pour refroidir les atomes, dans un environnement de micro-gravité. Ces tests se poursuivent actuellement et sont encourageants. Plusieurs autres laboratoires dans le monde s'engagent dans des recherches analogues. Il existe un espoir raisonnable que cette nouvelle méthode conduise d'ici peu à des horloges atomiques cent fois plus précises que les meilleures horloges actuelles, atteignant ainsi une stabilité de 10^{-16} par jour en valeur relative. De nombreux domaines bénéficieraient d'une telle amélioration, comme la navigation, le système global de positionnement utilisant des satellites et des horloges pour repérer la position de n'importe quel objet à la surface du globe terrestre avec une précision de quelques dizaines de centimètres. Là encore, sur cet exemple précis, il apparaît clairement que ce ne sont pas ces perspectives d'applications qui ont été à la base des réflexions sur l'étude du mouvement d'un atome dans une onde laser. Les motivations réelles étaient et sont toujours de comprendre les mécanismes d'échange d'impulsion entre atomes et photons et les limites éventuelles introduites par les fluctuations quantiques de ces échanges. Les progrès dans cette compréhension ont débouché sur un meilleur contrôle de la vitesse des atomes et c'est à ce moment seulement que des perspectives intéressantes d'application sont apparues.

Je voudrais maintenant conclure cet exposé par quelques réflexions sur les qualités intellectuelles et morales qu'une pratique bien conduite de la recherche permet à mon avis d'acquérir.

Une première qualité développée par l'activité de recherche est, me semble-t-il, la curiosité, le désir d'apprendre. La confrontation avec un savoir qui évolue sans cesse fait prendre conscience très vite de l'insuffisance de ses connaissances, de la nécessité de les mettre sans cesse à jour, d'apprendre de nouvelles techniques, de maîtriser de nouveaux concepts mathématiques, de nouveaux langages. Le vrai chercheur est un éternel étudiant qui a toujours envie d'élargir sa formation, de se perfectionner, de développer son imagination. Je me souviendrai toujours avec émotion des confidences que me faisait Alfred Kastler au moment de prendre sa retraite, à l'âge de soixante-dix

ans. Il me disait sa joie d'avoir moins de responsabilités et de disposer ainsi de plus de temps pour approfondir ses connaissances en mécanique quantique. Peut-on imaginer meilleur exemple de modestie et de jeunesse d'esprit ?

La pratique de la recherche est également un excellent exercice pour développer la sûreté de jugement et l'esprit critique. Pour progresser dans ses investigations, le chercheur doit en permanence élaborer des modèles qui partent de ses observations et lui permettent de poser de nouvelles questions, de tester la validité de ce modèle, éventuellement de l'infirmer, de l'améliorer, de le transformer. L'histoire des sciences montre très bien qu'il n'y a pas de théorie définitive, que des notions qui paraissent aussi évidentes que la symétrie droite-gauche, la simultanéité de deux événements se déroulant en deux lieux différents, l'existence d'une trajectoire pour une particule, peuvent être remises en question et soumises au test de l'expérience. Devant une situation complexe, le chercheur apprend à se méfier des fausses certitudes et des opinions toutes faites, à explorer les diverses hypothèses possibles en les soumettant à un examen critique et rigoureux.

Une autre caractéristique importante de l'apprentissage du savoir est la prise de conscience de l'importance du dialogue et de la confrontation des idées. La vie quotidienne d'un laboratoire est ponctuée de réunions où les membres d'une équipe discutent de la meilleure stratégie possible pour résoudre un problème, pour analyser des résultats qui semblent anormaux. Pour un jeune chercheur débutant, rien ne peut remplacer l'apprentissage direct d'une technique, d'une méthode, d'un concept auprès d'un chercheur plus expérimenté qui saura lui indiquer où se situent les vraies difficultés et comment les surmonter. Une fois que les résultats ont été obtenus ou qu'un phénomène nouveau a été identifié, une autre étape essentielle de l'activité de recherche consiste à les soumettre au jugement de la communauté scientifique. Il faut expliquer son travail, le plus clairement possible, répondre aux objections qui sont formulées, reconnaître ses erreurs s'il y en a, reprendre et compléter ses analyses si elles sont insuffisantes, améliorer son argumentation, en un mot obtenir l'adhésion d'autrui. Le savoir ne peut progresser que s'il diffuse efficacement au sein de la communauté scientifique. Il faut pour cela déployer des efforts d'explication et de clarification qui me paraissent tout aussi importants que l'activité de recherche elle-même. Face aux préjugés, aux idées préconçues qui, malheureusement, empoisonnent de plus en plus les relations humaines, peut-on imaginer meilleure école que celle du dialogue scientifique, qui dépasse les frontières, et où l'on apprend à respecter l'opinion des autres et à échanger des arguments plutôt qu'à asséner de prétendues vérités.

Dans la première partie de mon exposé, j'ai insisté sur l'importance des concepts unificateurs et des grandes synthèses qui permettent à un savoir qui se ramifie sans

cesse de se recentrer autour de grandes idées. L'activité de recherche me semble idéale pour développer le sens de l'universel. On ressent incontestablement une émotion esthétique devant une belle théorie, une belle explication, qui établit des «correspondances» nouvelles, qui fait ressortir les éléments essentiels d'une réalité complexe et la rend d'un coup plus intelligible. Acquérir la formation scientifique suffisante pour pouvoir apprécier pleinement les grandes synthèses du savoir me paraît être un élément essentiel de la culture, au même titre que l'art ou la littérature. N'est-il d'ailleurs pas possible de considérer la création scientifique elle-même comme une forme d'art ?

Je viens de brosser devant vous les grands traits d'une initiation au savoir qui, je le reconnais, n'est pas facile à réaliser. Elle nécessite un état d'esprit, une sérénité et un équilibre qui sont fragiles, car très sensibles aux crises que traverse la société, aux pressions exercées par des objectifs à court terme qui, malheureusement, prennent souvent le pas devant une vision généreuse et hardie de notre avenir. La recherche est une entreprise de longue haleine, qui nécessite une vision à long terme, qui ne doit prendre en compte que des critères de qualité et d'originalité. Elle dépasse les clivages politiques et a besoin d'un climat de confiance et de liberté. Certains pourraient penser qu'une telle activité, qu'une telle liberté, représentent un luxe déplacé dans les conditions de crise économique que nous connaissons actuellement. Je pense très sincèrement qu'ils se trompent. L'humanité a déjà traversé de nombreuses périodes de crise, et les périodes de renaissance qui les ont suivies ont toujours été le fruit d'un renouveau culturel, scientifique, artistique. A l'aube du XXI^e siècle, parier sur le développement du savoir, de l'intelligence et de la générosité me paraît être le meilleur investissement que l'on puisse faire pour assurer des lendemains meilleurs.