

Entretien avec Jean Dalibard, médaille d'or 2021 du CNRS

À l'occasion de la médaille d'or du CNRS qui lui a été remise le 8 décembre 2021, Jean Dalibard s'est prêté à un entretien avec Michèle Leduc et Michel Le Bellac pour *Reflets de la Physique*.

Dans une première partie scientifique, il évoque ses motivations en recherche et les étapes de ses découvertes qui suivent de près les progrès du domaine des atomes froids depuis les années 1980, avec une attention particulière pour la topologie des gaz quantiques en dimension réduite. La seconde partie est consacrée à sa vision de divers problèmes de notre société sur lesquels il aimerait agir en utilisant la notoriété de sa médaille, tels que les relations recherche-industrie, le niveau scolaire des élèves du primaire, l'ascenseur social, l'état de la recherche en France et la perception de la science par le public.

Michèle Leduc : Merci, Jean, de nous accorder cet entretien. Peux-tu commencer par expliquer pourquoi tu as choisi le sujet des atomes froids à une époque où rien ne laissait présager la belle destinée de ce domaine ?

Jean Dalibard : Quand on choisit un sujet de thèse, c'est autant le directeur de thèse que le sujet lui-même qui est déterminant. En ce qui me concerne, j'aurais suivi Claude Cohen-Tannoudji sur à peu près n'importe quel sujet. J'avais écouté une de ses conférences à l'été 1979 sur les débuts de la manipulation d'atomes par laser. Les premiers ions piégés et refroidis avaient été observés, mais rien du côté atomes neutres. Quand Claude m'a suggéré ce thème pour ma thèse d'État, je n'ai pas hésité, je trouvais très ludique d'accélérer ou arrêter des particules en les éclairant. En plus, cela faisait appel à des outils que j'aimais bien, mélangeant la mécanique quantique et la physique statistique, avec les notions sous-jacentes de système ouvert et d'équilibre thermodynamique.

ML : Comment s'est organisée ta participation à l'équipe « atomes froids » du LKB ?

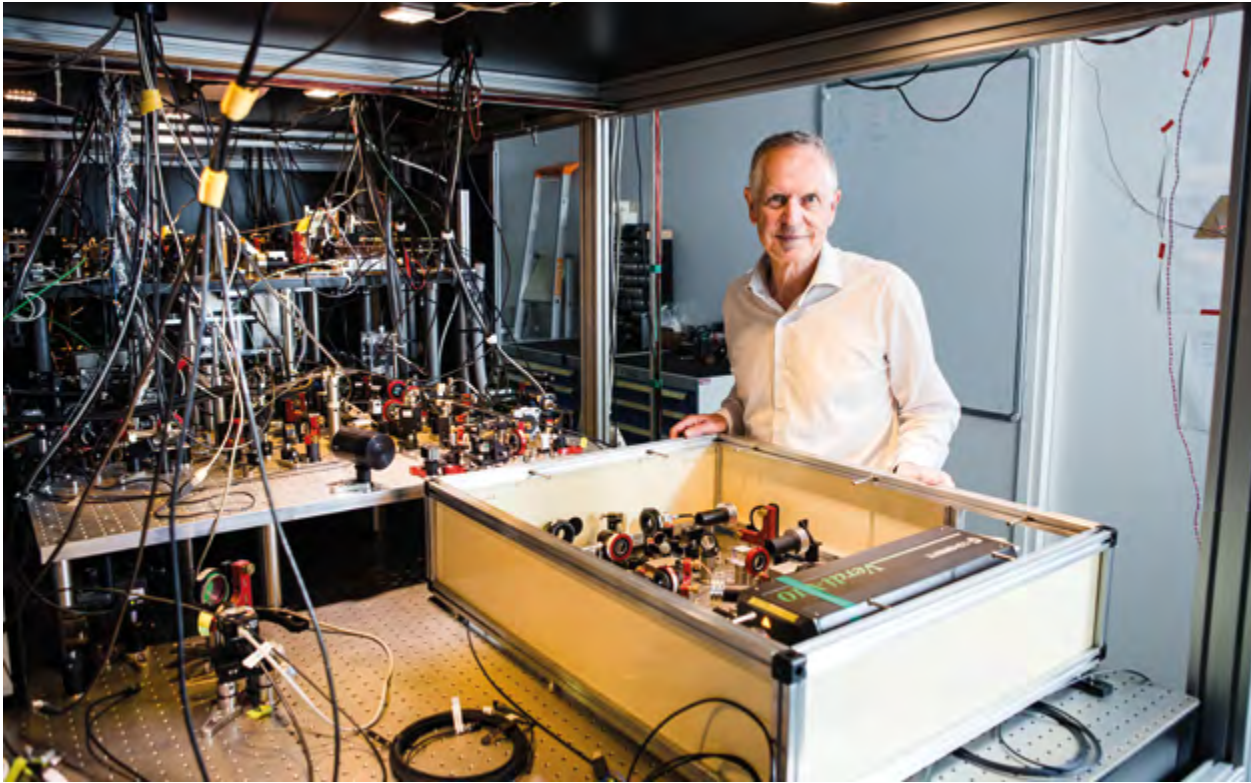
JD : J'ai commencé avec Claude en 1982 et nous avons essentiellement développé des approches théoriques pendant les premières années. Un conseil de labo « officieux » au Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne (l'ancêtre du LKB) avait conclu qu'il semblait trop difficile de monter une expérience d'atomes froids à ce stade. Puis Alain Aspect a été recruté en 1984 sur un poste de sous-directeur au Collège de France, après ses expériences à Orsay sur la violation des inégalités de Bell. Alain a proposé à Christophe Salomon, en postdoc à Boulder à ce moment-là, de nous rejoindre : la masse critique était atteinte pour pouvoir démarrer des expériences.

ML : Quelles ont été les premières étapes de ta recherche ?

JD : Nous avons d'abord cherché à comprendre le refroidissement dans les mélasses optiques, notamment en développant et en testant le modèle de « l'effet Sisyphe »^(a). Puis sont arrivés les réseaux optiques, la condensation de Bose-Einstein et les gaz de Fermi dégénérés. À partir de 2000-2005, les questions se sont beaucoup diversifiées avec la réalisation de gaz présentant de fortes corrélations entre les particules, et les résonances de Feshbach qui permettent de modifier à volonté les interactions entre atomes.

ML : Si l'on revient en arrière, il y a eu le célèbre piège magnéto-optique, devenu l'outil de base pour des milliers d'équipes qui utilisent des atomes froids. On t'en attribue la paternité : peux-tu nous dire un mot de sa conception ?

JD : C'est une histoire à la fois amusante et frustrante. J'avais conçu ce schéma pour tout autre chose, en cherchant à obtenir des températures plus basses que la limite connue à l'époque, appelée limite Doppler. À l'époque, on n'avait pas encore découvert le refroidissement Sisyphe, ni le refroidissement subrecul. J'avais donc songé à superposer un gradient de champ magnétique à une mélasse optique, de sorte que les atomes soient hors résonance sur l'essentiel de la région d'intérêt et n'interagissent avec la lumière que sur les bords de cette zone. Malheureusement, en dépit de cette obscurité effective induite par le champ magnétique, la température ne descendait pas en dessous de la limite Doppler. J'étais donc déçu, même si j'avais vu, après quelques simulations numériques, que c'était efficace pour le piégeage. J'ai transmis l'idée à la collaboration MIT-Bell Labs qui l'a mise en œuvre avec succès, alors que les autres essais de piégeage par pression de radiation ne marchaient pas.



© Frédérique PLAS / LKB / CNRS Photothèque

Jean Dalibard, devant la table optique d'une salle d'expérimentation du Laboratoire Kastler Brossel.

Michel Le Bellac : Peux-tu nous parler de la physique en deux dimensions, celle qui t'a passionné et qui t'occupe encore aujourd'hui ? Pourquoi 2D plutôt que 3D, 1D, 0D ?

JD : En fait, toutes les dimensions sont intéressantes : nous avons fait de jolies expériences « zéro-D » avec Fabrice Gerbier ; à 3D, on a des transitions de phase de type « Landau » quand on fabrique un condensat de Bose-Einstein. À 1D ou 2D, il n'y a pas de brisure spontanée d'une symétrie continue parce qu'il y a trop de fluctuations, donc pas de choix d'une phase pour la fonction d'onde du condensat. Néanmoins, il y a quand même à 2D une transition de phase topologique à la Kosterlitz-Thouless, plus subtile que la condensation (travail récompensé par le prix Nobel 2016). Un autre intérêt du gaz de Bose bidimensionnel est son invariance d'échelle : si l'on dilate les distances et le temps, on obtient un système de même dynamique que celui dont on est parti, au moins tant que les interactions ne sont pas trop fortes. Enfin à 2D, la statistique quantique est plus riche qu'à 3D : quand on échange des particules, il est en principe possible d'avoir n'importe quel facteur de phase, pas uniquement les + et - des bosons et fermions, on parle ainsi d'anyons^(b).

ML : Crois-tu encore à beaucoup d'avenir pour les gaz quantiques, en général et en dimension réduite ?

JD : Un gros morceau est d'essayer d'émuler l'effet Hall quantique fractionnaire avec des atomes froids : on pourrait alors rechercher les anyons comme des excitations d'un système à la topologie non triviale. Un autre champ de recherche est celui baptisé "Precision many-body physics" : on peut faire sur ces gaz quantiques des mesures précises

de coefficients du problème à N corps, qui fournissent des tests contraignants de la théorie.

C'est par exemple le cas du gaz de Fermi unitaire (où les fermions interagissent avec une longueur de diffusion infinie), qui est invariant d'échelle et caractérisé par quelques nombres sans dimension.

On trouve également une physique passionnante du côté des systèmes en interaction à longue portée avec les atomes froids en cavité, ou encore la turbulence quantique, particulièrement riche en dimension réduite.

MLB : Vous êtes un peu sur le même terrain que la physique de la matière condensée. Quel est le plus apporté par les atomes froids ?

JD : Je ne voudrais pas donner l'idée d'une hiérarchie entre les deux domaines. Si l'on veut fabriquer des dispositifs utiles à tout le monde, on le fera essentiellement avec des dispositifs de matière condensée, inégalables en termes de miniaturisation et de fiabilité. Mais les atomes froids fournissent des systèmes modèles très instructifs, qui réalisent des situations avec moins d'impuretés et des paramètres mieux contrôlés.

Par ailleurs, ils permettent de forcer la nature à faire ce dont on a envie. On sait réaliser une longueur de diffusion infinie, alors que ce n'est pas vraiment le cas en matière condensée ni pour les étoiles à neutrons, ou encore aborder l'effet Hall quantique entier avec des bosons, ce qu'on ne sait pas faire avec les gaz d'électrons de la matière condensée.

ML : Comment vois-tu les liens de ton domaine avec les autres disciplines à l'œuvre dans les très tentaculaires technologies quantiques ?

JD : Les atomes froids sont tout à fait dans la course, pas forcément pour l'ordinateur quantique universel, mais au moins pour la simulation quantique. On peut réaliser expérimentalement un système difficile à calculer qui sert ensuite de test pour les différentes approches théoriques. Je pense notamment aux manip où l'on maintient par des pinces optiques des atomes de Rydberg séparés les uns des autres ; on peut les coupler à distance, faisant sauter l'excitation de Rydberg d'un atome à l'autre : on réalise ainsi des portes quantiques logiques robustes. Les réseaux optiques avec plusieurs centaines, voire un millier d'atomes froids, fournissent également de superbes plateformes pour la simulation quantique.

ML : Si ces manip de simulation débouchent, elles permettent peut-être de mieux comprendre la supraconductivité ou d'autres phénomènes utiles à la vie courante. Comment vois-tu les liens entre la recherche fondamentale et les applications ?

JD : Le lien essentiel sur lequel je suis le mieux à même de jouer est celui de la formation des thésards qui iront irriguer l'entreprise — des compagnies comme Saint-Gobain, Thalès, l'ESA, ou encore des *start-up*. La formation par la recherche est incomparable. Je n'ai pas d'exemple d'un seul de mes thésards ayant souhaité aller dans l'industrie qui n'y ait pas réussi, et j'en suis très content. Tous ceux qui, pour une raison ou pour une autre, ont voulu quitter le monde académique ont trouvé un emploi correspondant à leur profil dans les six mois.

ML : Excellent message pour les jeunes ! Pourtant tes sujets de recherche sont assez abstraits pour des industriels et en France les entreprises ne recrutent pas encore beaucoup de docteurs.

JD : Les mentalités évoluent, les industriels recrutent désormais des docteurs, non pour leur sujet de thèse mais pour leur formation. Je suis par ailleurs impressionné par le nombre de *start-up* qui se sont créées autour du quantique en France, une vingtaine parmi lesquelles Muquans, Quandela, Pasqal, Alice et Bob, etc. Je retrouve dans leurs organigrammes les noms d'anciens chercheurs ayant travaillé avec moi. Les trentenaires ou les quadragénaires sont beaucoup moins frileux que nous il y a vingt ans.

ML : Dans Sirteq, le réseau des technologies quantiques en Île-de-France, tout personnel confondu il y a 20 % de femmes. Dans ton équipe tu as fait travailler pas mal de femmes, était-ce délibéré ?

JD : J'ai été heureux de travailler avec elles, mais il n'y en a pas eu tant que ça. Leur faible nombre dans nos labos de physique est même une de mes vraies préoccupations. Je peux prendre l'exemple de l'entrée à Polytechnique — une école chère à mon cœur car j'y ai enseigné vingt-cinq ans : 14 % de femmes en 1995, 19 % maintenant. Si la notoriété de ma médaille pouvait offrir un bouton pour accélérer cette progression, j'appuierais dessus immédiatement.

“ Je suis impressionné par le nombre de *start-up* qui se sont créées autour du quantique en France. ”

ML : Comment vois-tu les responsabilités que te donne le prestige de cette médaille ? Qu'est-ce qui te paraît important ?

JD : Il faut se méfier de la mise en lumière qui accompagne ce type de récompense et ne pas intervenir sur des sujets sur lesquels on n'est pas pertinent. J'aimerais surtout contribuer à améliorer la perception des sciences et des maths par les jeunes élèves et je m'inquiète de la dégringolade du niveau moyen dans ces matières pour notre pays. Pour les enquêtes internationales TIMSS qui testent les connaissances en sciences des élèves au niveau du CM1, la France est au-delà de la 40^e place, en queue des pays européens. Le dernier rapport TIMSS teste également la classe de 4^e et compare les années 1995 et 2019 : pratiquement tous les pays ont progressé, mais pas la France : les compétences en maths de nos jeunes élèves ont régressé de 50 points sur 500.

ML : Que penses-tu pouvoir faire, avec ta notoriété, pour être entendu du ministère de l'Éducation nationale ?

JD : Au Collège de France, Stanislas Dehaene pilote une action coordonnée des professeurs pour que les découvertes spectaculaires des neurosciences soient mieux prises en compte pour améliorer les méthodes classiques d'apprentissage. Je pense qu'il faudrait également mettre en place une meilleure formation aux sciences pour les enseignants de primaire, qui pour beaucoup ont eu un cursus littéraire. Je suis convaincu qu'une grande partie du goût pour les disciplines scientifiques s'acquiert à un jeune âge, et les professeurs des écoles sont donc les mieux placés pour développer ce goût. J'ai aussi un autre souci relié au précédent : la régression dramatique du fonctionnement de l'ascenseur social. J'en ai personnellement profité grâce aux professeurs de mon lycée de banlieue qui m'ont poussé jusqu'aux classes prépas. Mais cet ascenseur semble aujourd'hui plus mal en point qu'il y a quarante ans.

MLB : Peux-tu nous parler de la place que tu accordes à l'enseignement ? Tu as choisi d'être professeur au Collège de France, ce qui représente un énorme travail avec un cours nouveau chaque année. Avec ton poste au CNRS, tu aurais pu passer 100 % de ton temps dans ton labo...

JD : Je trouve extrêmement satisfaisant, après trente ans de recherche, de faire un état des lieux de la production de connaissances dont j'ai vécu l'histoire, dans la grande tradition du cours de Claude Cohen-Tannoudji par exemple. Ce peut être un thème qui a été très florissant, puis qui s'est quelque peu tari, ou au contraire l'instantané d'un domaine en train d'exploser ; dans les deux cas, c'est très enrichissant. Et j'actualise sans cesse mes notes de cours auxquelles je peux renvoyer mes auditeurs si je n'ai pas le temps de tout traiter. Je les mets sur internet plutôt que d'en faire des livres : c'est plus souple et c'est gratuit !

ML : Passons à une question plus politique : quelle est ta vision de l'état de la recherche aujourd'hui en France ? Un certain nombre d'académiciens et de professeurs au Collège de France ont écrit des tribunes manifestant leur inquiétude face au déclin de la recherche en France par rapport à la grande époque où notre pays était en pointe. Une loi de programmation pour la recherche a été récemment votée, te paraît-elle suffisante pour redresser le niveau ?

JD : Comme disent les mathématiciens, cette loi est nécessaire mais pas suffisante : la situation est vraiment préoccupante. Ainsi le recrutement des jeunes dans la carrière académique est de plus en plus tardif. À mon époque, nous étions recrutés vers 25 ans ; maintenant il faut quatre, voire six ans de postdoc pour prétendre à un poste, sans plus de moyens ou de responsabilités que pour nous au démarrage : dans de telles conditions, un premier poste permanent à 33 ans n'est pas très attractif ! Certes il y a toujours de très bons candidats au CNRS ou comme maîtres de conférence, mais plusieurs de mes doctorants très prometteurs ont récemment choisi, après leur postdoctorat, de ne candidater que sur des postes académiques à l'étranger. D'autres, qui visaient avant leur postdoc une carrière d'enseignant-chercheur, se tournent d'emblée vers le privé à leur retour, car il leur offre un meilleur salaire et surtout plus de responsabilités.

ML : Que penses-tu du financement de la recherche dans ton domaine ? Est-ce compétitif en France par rapport aux pays voisins comme l'Allemagne ?

JD : Pour mon équipe, les bourses ERC ont été essentielles. Sans ces financements européens, nous n'aurions pu obtenir qu'une petite fraction de nos résultats. Cela nous a permis de rester compétitifs et aux plus jeunes recrutés de devenir autonomes. Pour ce qui est de l'ANR, c'est une aide précieuse pour démarrer une ligne de recherche, mais je trouve problématique « l'atterrissage » à la fin d'un contrat : quand on a fait du bon travail sur un sujet et que ce sujet reste porteur, pourquoi faut-il prétendre qu'on va faire des choses radicalement nouvelles pour obtenir un autre financement ANR ? C'est une grande différence avec nos collègues américains, dont les bourses NSF sont bien souvent renouvelées. L'autre point noir de l'ANR, c'est bien sûr son taux de succès extrêmement bas, même s'il a un peu remonté. Mon sentiment est qu'il devrait avoisiner 30%, comme dans les toutes premières années qui ont suivi la création de l'ANR.



Séminaire de Jean Dalibard au Laboratoire Kastler Brossel.

© Jean-François Dars

ML : L'épidémie de Covid a un peu modifié la perception de la science par le public, engendrant du scepticisme si ce n'est une certaine perte de confiance. Le ressens-tu dans ton entourage ?

JD : Il faut beaucoup d'efforts pour faire comprendre les probabilités et la loi exponentielle ! Plus généralement, la leçon que je tirerai, c'est la nécessité de dire et redire ce qu'est la méthode scientifique : évaluer les limites de nos connaissances, savoir dire sans honte « je ne sais pas » tant que nous n'avons pas les éléments en mains, et finalement expliquer comment on arrive à une conclusion, même si elle n'est que provisoire.

ML : Tu es très rompu aux expertises en tout genre qu'on demande de plus en plus aux scientifiques. N'aurais-tu pas envie d'utiliser la notoriété de ta médaille pour être mieux écouté par les décideurs politiques ?

JD : Je me méfierais de donner mon avis sur un plateau de télévision face à un débateur redoutable, je n'ai pas la formation indispensable à un tel exercice. En revanche, c'est tout à fait le rôle de la SFP de manière collective : après son beau dossier sur le nucléaire il y a trois ans, elle serait par exemple tout à fait habilitée à discuter les scénarios de production d'électricité pour la France.

Merci à Anne Papillault et Jean-François Dars pour la photo de Jean Dalibard et leur aide à la transcription de cet entretien. Réalisateurs de documentaires, ils sont auteurs de la série Histoires courtes (www.lx.fr) où l'on peut trouver en particulier celle de Jean Dalibard, Le Plat Pays : <https://vimeo.com/328810520>

(a) Le refroidissement Doppler utilise le déplacement Doppler des niveaux d'énergie dû à l'agitation thermique des atomes. Il permet de descendre à des températures de l'ordre de la centaine de microkelvins, la température Doppler, qui est contrôlée par la largeur de raie de la transition utilisée. La température de recul, beaucoup plus basse et de l'ordre de la centaine de nanokelvins, est contrôlée par l'impulsion de recul des atomes due à l'émission aléatoire de photons. L'effet Sisyphus, découvert par Jean Dalibard et Claude Cohen-Tannoudji [1], permet d'expliquer comment on atteint cette température de recul. Cet effet combine la décomposition des niveaux d'énergie en niveaux hyperfins, et les déplacements des niveaux d'énergie sous l'effet de l'illumination par un laser non résonnant, avec comme conséquence que l'atome est soumis à un potentiel fait de collines et de vallées. En s'arrangeant pour que l'atome ne rencontre que des collines à remonter, on fait décroître son énergie cinétique, et donc sa température, jusqu'à la température de recul.

[1] J. Dalibard et C. Cohen-Tannoudji, *J. Opt. Soc. Am. B*, **6** (1989) 2023-2045.

(b) Les anyons : lorsqu'on échange deux particules identiques, le vecteur d'état est multiplié par un facteur de phase. En dimension trois, ce facteur de phase ne peut prendre que les valeurs +1 ou -1 : le premier cas correspond aux bosons et le second aux fermions. En dimension deux, pour des raisons topologiques, le facteur de phase peut prendre n'importe quelle valeur, "any value", d'où la dénomination "anyon".