



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Physique

William Phillips

Historical foreword: Jean Dalibard, the magneto-optical trap, and the ascent of physics with cold atomic gases


Volume 24, Special Issue S3 (2023), p. 5-13

Online since: 2 February 2024

Part of Special Issue: CNRS Gold Medal Jean Dalibard / *Médaille d'or du CNRS Jean Dalibard*

Guest editors: Yvan Castin (Laboratoire Kastler Brossel (UMR 8552), Département de physique de l'ENS, Paris, France) and Klaus Mølmer (Institut Niels Bohr, Université de Copenhague, Danemark)

<https://doi.org/10.5802/crphys.172>

 This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*The Comptes Rendus. Physique are a member of the
Mersenne Center for open scientific publishing*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1878-1535



CNRS Gold Medal Jean Dalibard / *Médaille d'or du CNRS*
Jean Dalibard

Historical foreword: Jean Dalibard, the magneto-optical trap, and the ascent of physics with cold atomic gases

Avant-propos historique: Jean Dalibard, le piège magnéto-optique et l'essor de la physique des gaz atomiques froids

William Phillips ^{*,a}

^a Joint Quantum Institute, University of Maryland and National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8424, USA

E-mail: william.phillips@nist.gov

Abstract. I present my personal perspective on the importance of the invention by Jean Dalibard of the magneto-optical trap (MOT), which has for many years been the “workhorse” of the field of laser cooling and cold atomic gases. I recount some of the history related to the MOT and argue that its invention enabled cold atomic gases to become the dominant part of Atomic, Molecular, and Optical (AMO) physics that it is today.

Résumé. Je présente mon point de vue personnel sur l'importance qu'a eu l'invention par Jean Dalibard du piège magnéto-optique (PMO), qui a été pendant de nombreuses années la « cheville ouvrière » du domaine du refroidissement laser et des gaz d'atomes froids. Je raconte une partie de l'histoire liée au PMO et je soutiens la thèse selon laquelle son invention a permis aux gaz d'atomes froids d'accéder à la place dominante en physique atomique, moléculaire et optique qu'ils occupent aujourd'hui.

Keywords. Jean Dalibard, magneto-optical trap, MOT, laser cooling and trapping, radiation pressure trap, optical Earnshaw theorem.

Mots-clés. Jean Dalibard, piège magnéto-optique, PMO, refroidissement et piégeage par laser, piège à pression de radiation, théorème d'Earnshaw optique.

Manuscript received and accepted 21 November 2023.

* Corresponding author.

La version française suit la version anglaise

In recognition of his entire research career, in December 2021, Jean Dalibard received the Gold Medal of the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France's highest accolade for scientific research. In this historical foreword of the special issue of *Comptes Rendus Physique* celebrating the Gold Medal and Jean's many research accomplishments, I present my personal perspective on the importance of the invention by Jean of the magneto-optical trap (MOT), which has for many years been the “workhorse” of the field of laser cooling and cold atomic gases. I recount some of the history related to the MOT and argue that its invention enabled cold atomic gases to become the dominant part of Atomic, Molecular, and Optical (AMO) physics that it is today.

In the late 1980s, Jean Dalibard conceived of the idea of what we now call the Magneto-Optical Trap (MOT). At the time, a number of groups were trying to develop a trap for cold atoms that used the radiation pressure force to provide the trap restoring force. Some of those ideas were published and some were shown to be unworkable. Although Dalibard never published his idea, it quickly became known throughout the laser cooling community, and its subsequent experimental demonstration soon cemented its place as the principal tool of laser cooling and trapping. Today, almost 40 years after its invention, it appears that most of the young researchers in the field, including those who use MOTs every day, are unaware that Dalibard was the inventor and that his invention changed the course of cold atom physics. My purpose in writing this short text is to remind the community of these facts, as I see them.

An early incarnation of the idea of a radiation pressure trap for cold atoms, and an ancestor of the MOT, was, in my view, a 1978 paper by Ashkin [1]. Here (see [1, Fig. 1]) Ashkin proposed a trap in which radiation pressure (also known as the spontaneous force or scattering force) provided trapping (a restoring force) along the axis of propagation of two counter-propagating laser beams focused at different points. The foci of the laser beams are arranged to provide the restoring force, with the beam propagating to the right being focused to the left of the trap center and the one propagating to the left being focused to the right of trap center. In that geometry, each laser beam is diverging at the center of the trap, where atoms are to be confined. An atom along the axis of the trap would, when displaced to the left of trap center, encounter a higher intensity of the right-going laser, and hence a restoring force, and similarly for an atom displaced to the right of trap center. The restoring force in the direction transverse to the laser is provided by the dipole force [2]. (Ref. [2] is noteworthy not only for its masterful treatment of dipole forces but also for the amusing photograph of Jean Dalibard as a graduate student on the last page.)

To my knowledge, this trap idea, which is a hybrid depending on both radiation pressure and dipole forces, was only once put into practice, in one of the early experiments to study collisions of laser-cooled atoms [3]. In spite of that, and in spite of the fact that in 1978 many features of laser cooling and trapping were not well-understood (for example, the paper underestimates the difficulty of decelerating an atomic beam and predicts the wrong temperature for the trapped atoms), it had an important influence in proposing a configuration that both traps and cools. Also of significance, it proposed a single, focused laser beam as a trap using only dipole forces, which is today widely used and known as an optical tweezer, and which can trap not only atoms but also more macroscopic dielectric objects like living cells, an application that earned Ashkin a Nobel prize in Physics in 2018.

Within a few years, others tried to extend the radiation-pressure part of the hybrid 1978 Ashkin trap. A 1982 paper [4], after recalling Ashkin's one-dimensional trapping configuration, proposed extending it by creating that same configuration along each orthogonal coordinate axis, creating a three-dimensional radiation pressure trap (see the discussion in [4] between Eqs. (39) and (40)). Shortly thereafter, another paper [5] proposed a minimal configuration in which four

intersecting laser beams, with their foci upstream of their intersection point, created a three-dimension radiation pressure trap. The authors noted some of the outstanding advantages of such a trap: that it both traps and cools, allowing continuous capture of atoms; that it requires relatively modest laser power; and that it should be easy to implement experimentally. Another obvious advantage is that with the requirement of only modest laser intensity, on the order of the typical saturation intensity of a few mW/cm^2 , the trap could have dimensions on the order of a centimeter, and be effective in capturing atoms from decelerated atomic beams, which were beginning to be demonstrated [6].

Sadly, none of these features were to be realized using these ideas. In 1983 Ashkin and Gordon [7] proved that such radiation pressure traps could not be stable in three dimensions. The basic idea, similar to the familiar Earnshaw theorem forbidding the trapping of a charged particle by static electric fields in a charge-free region, is that trapping along one axis is accompanied by expulsion along the orthogonal axes, and that expulsion cannot be overcome by the other trapping fields because of the zero divergence of the Poynting vector.

The conclusion by Ashkin and Gordon that “...the scattering force *by itself* cannot form a trap.” (emphasis added) was deeply discouraging because of the clear advantages of a radiation pressure trap. Accordingly, researchers sought ways to circumvent the Optical Earnshaw Theorem by violating its premises. One approach was to make the laser fields time-varying. Dalibard and Phillips [8] proposed alternating the application of separated-focus counterpropagating laser beams along three orthogonal coordinate axes, in the spirit of rf ion traps (Paul traps) that rely on the pseudo potential created by micromotion induced by the alternation. (The successful trap of Ref. [3] also used a time-alternation of beams, but this was done to avoid heating due to a strong standing wave and to maximize cooling by applying cooling beams when the trap was off, both approaches suggested by Dalibard and colleagues. This was unrelated to the alternation proposed in [8].) However, a numerical simulation of the process [9] suggested that the velocity damping due to laser cooling was so strong that micromotion was unable to establish a trap. Those numerical simulations did, however, show that even atoms in the intersection of unfocused (collimated) laser beams would, because of the strong damping, exhibit diffusive motion that would significantly retard the escape of the atoms. The authors dubbed this a “molasses trap”, while recognizing that it was not a trap at all, since it lacked a restoring force. They suggested that such a laser configuration in a vapor cell could collect atoms from the low end of the thermal velocity distribution. Independently, the group at Bell Labs demonstrated the molasses effect [10] and called it “optical molasses.” Optical molasses continues to play a major role in laser cooling, although the origin of the name as coming from the viscous confinement of atoms has been largely forgotten.

The prospect of making spatially large radiation pressure traps motivated researchers to continue to search for ways to circumvent the Optical Earnshaw Theorem. As pointed out in [11], besides making the laser beams time-varying, this could be done by making the atom’s photon absorption rate depend on something other than the laser intensity—for example, an imposed magnetic field or the atom’s internal state as altered by optical pumping. Ref. [11] proposed a number of schemes, all using a geometry (see [11, Fig. 1]) of focused, counterpropagating laser beams with separated foci, which, unlike the geometry proposed in [1, 4], or [5] had each laser beam converging at the trap center. To my knowledge, none of the proposed ideas of [11] were ever realized experimentally.

(As an aside, I note that a significantly later paper [12] proposed and demonstrated a “Trap Relying On Optical Pumping” (TROOP), a radiation-pressure trap that used a geometry significantly different from any in Ref. [11]. While it worked well, and had the advantage of not requiring a magnetic field, it never made a significant impact on the field of cold atoms.)

All of this history set the stage for Jean Dalibard's revolutionary invention of the MOT. Ref. [13] describes both how the MOT works and the first experimental realization. As I understand it, the authors of [13] offered that Jean Dalibard be a co-author on that ground-breaking paper, but, with characteristic modesty, Jean declined, claiming that he simply supplied the idea. The paper's closing remarks contain the following acknowledgment of Jean's crucial contribution: "We are extremely grateful to Jean Dalibard for giving us the seminal idea for this trapping scheme."

That "seminal idea" has received textbook [14] and summer-school-notes [15] treatment. The idea is simple and powerful. Collimated, counterpropagating, circularly polarized, laser beams with opposite helicity illuminate the center of a spherical-quadrupole magnetic field [16]. Atoms moving in either direction along the laser propagation axis are Zeeman shifted into resonance with the properly polarized laser beam that forces them back toward the trap center. That the magnetic field varies linearly with displacement from the center of the trap and changes direction when passing through the center is a key feature.

Among the beautiful and powerful features of the MOT are that the simple idea described above in one-dimension, and originally conceived (and typically described [13, 14], and [15]) as operating on a $J = 0 \Rightarrow J = 1$ transition, works well in three-dimensions and on higher angular momentum $J \Rightarrow J+1$ systems. Originally conceived in the context of Doppler cooling, the MOT works well for sub-Doppler cooling and routinely reaches sub-Doppler temperatures. I and others have described the MOT as the "workhorse trap" of laser cooling and trapping because it does such a good job of producing large (typically hundreds of micrometers or millimeter-size) clouds of cold atoms, with atomic densities on the order of a few 10^{11} cm^{-3} , a density that is typically limited by the balance of collisional losses and loading rate, along with the effective atom-atom repulsion due to spontaneous emission of photons and their reabsorption. The loading rate can be quite high, given the size of the trapping laser beams (on the order of a centimeter) and the strong damping due to laser cooling. The loading works so well that the MOT can capture the low-velocity tail of a Maxwell-Boltzmann distribution in a vapor cell, doing with ease what optical molasses (see above) struggles to do—produce a dense cloud of cold atoms without first decelerating a "hot" atomic beam. The simplified equations of motion for an atom in a MOT correspond to a damped harmonic oscillator [15] with the MOT process providing the restoring force and Doppler cooling providing the viscous damping. Typical operating parameters make the oscillator over-damped.

Many publications describe the details of the real-world operation of the MOT, as well as the improvements to that operation, and the application of MOTs to essentially all aspects of cold atom physics. A discussion of these is beyond the scope of this historical foreword. That such improvements were possible and such applications were made is further testament to the beauty and power of the original idea. Today, almost every experiment involving laser cooling of atoms (and most experiments in Atomic, Molecular, and Optical (AMO) physics seem to involve laser cooling) uses a MOT to produce the initial cold atom gas on which experiments are done or from which one produces even colder and denser atom clouds, often reaching Bose or Fermi quantum degeneracy. Of particular current interest is the use of a MOT to load arrays of single trapped atoms for use in quantum information applications.

It is my opinion that, after the original idea of laser cooling [17] and [18], the invention of the MOT is the most important development in cold atom physics. The MOT revolutionized the field of cold atoms, making widespread what was once a minor activity of AMO physics. Even the discovery [19, 20] of sub-Doppler cooling (the most satisfying explanation of which is due to Dalibard and Cohen-Tannoudji [21]), which made possible the efficient operation of the first atomic-fountain-clocks and the achievement of the first atomic gas Bose-Einstein condensation, was not as important, considering that today some of the most important cold atom experiments are done with atoms not exhibiting sub-Doppler cooling. Without the MOT, I have difficulty

seeing how it would have been possible to achieve either Bose–Einstein condensation or Fermi degeneracy in atomic gases, phenomena that are the starting point for many of the most exciting experiments being done today in the field of cold atomic gases.

For the current richness of the experimental field of cold atomic gases, a richness that has often been propelled by the work of Jean Dalibard himself, we have to thank his brilliant and revolutionary invention of the magneto-optical trap, the MOT.

Version française

Pour l'ensemble de sa carrière de chercheur, Jean Dalibard a reçu en décembre 2021 la Médaille d'Or du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), la plus haute distinction scientifique française. Dans cet avant-propos historique du dossier thématique de *Comptes Rendus Physique* célébrant la Médaille d'Or et les nombreuses réalisations de Jean en matière de recherche, je présente mon point de vue personnel sur l'importance de l'invention par Jean du piège magnéto-optique (PMO, MOT en anglais), qui a été pendant de nombreuses années la « cheville ouvrière » du domaine du refroidissement laser et des gaz d'atomes froids. Je retrace une partie de l'histoire du PMO et je soutiens la thèse selon laquelle son invention a permis aux gaz d'atomes froids d'accéder à la place dominante en physique atomique, moléculaire et optique (PAMO) qu'ils occupent aujourd'hui.

À la fin des années 1980, Jean Dalibard a eu l'idée de ce que nous appelons aujourd'hui le piège magnéto-optique (PMO). À l'époque, plusieurs groupes tentaient de mettre au point un piège pour atomes froids utilisant la force de pression de radiation pour créer la force de rappel du piège. Certaines de ces idées ont été publiées, d'autres se sont révélées irréalisables. Bien que Dalibard n'ait jamais publié son idée, elle s'est répandue rapidement dans la communauté du refroidissement laser, et sa démonstration expérimentale ultérieure l'a rapidement promue au rang de principal outil de refroidissement et de piégeage par laser. Aujourd'hui, près de 40 ans après son invention, il semble que la plupart des jeunes chercheurs dans ce domaine, y compris ceux qui utilisent des PMO tous les jours, ignorent que Dalibard en est l'inventeur et que son invention a changé le cours de la physique des atomes froids. Mon objectif en écrivant ce court texte est de rappeler à la communauté ces faits, tels que je les perçois.

Une des premières incarnations de l'idée d'un piège à pression de radiation pour les atomes froids, et un ancêtre du PMO, a été, à mon avis, un article publié en 1978 par Ashkin [1]. Dans cet article (voir sa figure 1), Ashkin a proposé un piège dans lequel la pression de radiation (également connue sous le nom de force spontanée ou de force de diffusion) assure le piégeage (une force de rappel) le long de l'axe de propagation de deux faisceaux laser contre-propageants focalisés en des points différents. Les foyers des faisceaux laser sont disposés de manière à créer une force de rappel, le faisceau se propageant vers la droite étant focalisé à gauche du centre du piège et celui se propageant vers la gauche étant focalisé à droite. Dans cette configuration, chaque faisceau laser diverge vers le centre du piège, où les atomes doivent être confinés. Un atome situé sur l'axe du piège verrait, lorsqu'il est déplacé vers la gauche du centre du piège, une augmentation de l'intensité du laser se dirigeant vers la droite, et donc une force de rappel, et de même pour un atome déplacé vers la droite du centre du piège. La force de rappel dans la direction transverse au laser est fournie par la force dipolaire [2]. (La référence [2] est remarquable non seulement pour son traitement magistral des forces dipolaires, mais aussi pour la photo amusante de Jean Dalibard, jeune docteur de troisième cycle, à la dernière page).

À ma connaissance, cette idée de piège, qui est un hybride reposant à la fois sur la pression de radiation et les forces dipolaires, n'a été mise en pratique qu'une seule fois, dans l'une des premières expériences visant à étudier les collisions d'atomes refroidis par laser [3]. Malgré cela, et malgré le fait qu'en 1978, de nombreuses caractéristiques du refroidissement et du piégeage

par laser n'étaient pas bien comprises (par exemple, l'article sous-estime la difficulté de décélérer un faisceau atomique et prédit une température erronée pour les atomes piégés), il a eu une influence importante en proposant une configuration qui permet à la fois de piéger et de refroidir. Il a également proposé un faisceau laser unique et focalisé comme piège reposant uniquement sur les forces dipolaires, qui est aujourd'hui largement utilisé et connu sous le nom de pince optique, et qui peut piéger non seulement des atomes mais aussi des objets diélectriques plus macroscopiques tels que des cellules vivantes, une application qui a valu à Ashkin le prix Nobel de physique 2018.

Quelques années plus tard, d'autres ont essayé d'étendre la partie pression de radiation du piège hybride d'Ashkin de 1978. Un article de 1982 [4], après avoir rappelé la configuration de piégeage unidimensionnelle d'Ashkin, a proposé de l'étendre en créant cette même configuration le long de chaque axe d'un repère orthonormé, créant ainsi un piège tridimensionnel à pression de radiation (voir la discussion dans la référence [4] entre les équations (39) et (40)). Peu après, un autre article [5] a proposé une configuration minimale dans laquelle quatre faisceaux laser se croisant, avec leurs foyers en amont de leur point d'intersection, créent un piège à pression de radiation tridimensionnel. Les auteurs ont noté certains des avantages remarquables d'un tel piège : il piège et refroidit à la fois, ce qui permet une capture continue des atomes; il nécessite une puissance laser relativement modeste; et il devrait être facile à mettre en œuvre expérimentalement. Un autre avantage évident est qu'avec une intensité laser modeste, de l'ordre de l'intensité de saturation typique de quelques mW/cm^2 , le piège pourrait avoir des dimensions de l'ordre du centimètre et être efficace pour capturer des atomes à partir de faisceaux atomiques décélérés, qui commençaient à être obtenus [6].

Malheureusement, aucune de ces caractéristiques n'a pu être réalisée au moyen de ces idées. En 1983, Ashkin et Gordon [7] ont prouvé que de tels pièges à pression de radiation ne pouvaient pas être stables à trois dimensions. L'idée de base, similaire au théorème d'Earnshaw bien connu interdisant le piégeage d'une particule chargée par des champs électriques statiques dans une région sans charge, est que le piégeage le long d'un axe s'accompagne d'une expulsion le long des axes orthogonaux, et que l'expulsion ne peut pas être surmontée par les autres champs de piégeage en raison de la divergence nulle du vecteur de Poynting.

La conclusion d'Ashkin et Gordon, selon laquelle « ...la force de diffusion ne peut pas, à elle seule, former un piège. » (les italiques sont de nous) a été très décourageante en raison des avantages évidents d'un piège à pression de radiation. Par conséquent, les chercheurs ont cherché à contourner le théorème d'Earnshaw optique en violant ses hypothèses. L'une des approches consistait à faire varier les champs laser dans le temps. Dalibard et Phillips [8] ont proposé d'alterner l'application de faisceaux laser contre-propageants à focales séparées le long de trois axes orthogonaux, dans l'esprit des pièges à ions à radiofréquence (pièges de Paul) qui reposent sur le pseudo-potential créé par le micromouvement induit par l'alternance. (Le piège réussi de la référence [3] a également utilisé une alternance temporelle des faisceaux, mais cela a été fait pour éviter le chauffage dû à une onde stationnaire intense et pour maximiser le refroidissement en appliquant des faisceaux de refroidissement lorsque le piège était éteint, deux approches suggérées par Dalibard et ses collègues. Cela n'a rien à voir avec l'alternance proposée dans [8].) Cependant, une simulation numérique du processus [9] a suggéré que l'amortissement de la vitesse dû au refroidissement laser était si fort que le micromouvement était incapable d'établir un piège. Ces simulations numériques ont toutefois montré que même les atomes situés à l'intersection de faisceaux laser non focalisés (simplement collimatés) effectueraient, en raison du très fort amortissement, un mouvement diffusif qui retarderait considérablement leur fuite. Les auteurs ont baptisé ce phénomène « piège à mélasse », tout en reconnaissant qu'il ne s'agissait pas du tout d'un piège, puisqu'il n'y avait pas de force de rappel. Ils ont suggéré qu'une telle configuration laser dans une vapeur en cellule pourrait capturer les atomes les plus lents de

la distribution de vitesse thermique. Indépendamment, l'équipe des Laboratoires Bell a mis en évidence l'effet de mélasse [10] et l'a appelé mélasse optique. La mélasse optique continue de jouer un rôle majeur dans le refroidissement laser, bien que l'origine du nom, qui provient du confinement visqueux des atomes, ait été largement oubliée.

La perspective de créer des pièges à pression de radiation de grande taille a incité les chercheurs à continuer à chercher des moyens de contourner le théorème d'Earnshaw optique. Comme indiqué dans [11], outre le fait de faire varier les faisceaux laser dans le temps, cela pourrait être réalisé en faisant dépendre le taux d'absorption des photons par les atomes d'un autre ingrédient que l'intensité du laser - par exemple, en appliquant un champ magnétique ou en changeant l'état atomique interne par pompage optique. La référence [11] a proposé un certain nombre de schémas, tous utilisant une configuration de faisceaux laser focalisés et contre-propageants avec des foyers séparés (voir sa figure 1), qui, contrairement à celle proposée dans [1, 4], ou [5], avait chaque faisceau laser convergeant vers le centre du piège. À ma connaissance, aucune des idées proposées dans [11] n'a jamais été réalisée expérimentalement.

(Soit dit en passant, je note qu'un article beaucoup plus récent [12] a proposé et réalisé un « piège reposant sur le pompage optique » (TROOP en anglais), un piège à pression de radiation qui utilise une configuration sensiblement différente de celle de la référence [11]. Bien qu'il ait bien fonctionné et qu'il ait l'avantage de ne pas nécessiter de champ magnétique, il n'a jamais eu d'impact significatif sur le domaine des atomes froids).

Toute cette histoire est à l'origine de l'invention révolutionnaire du PMO par Jean Dalibard. La référence [13] décrit le fonctionnement du PMO et la première réalisation expérimentale. Si j'ai bien compris, les auteurs de [13] ont proposé à Jean Dalibard d'être co-auteur de cet article révolutionnaire, mais, avec la modestie qui le caractérise, Jean a refusé, affirmant qu'il avait simplement fourni l'idée. Les remarques finales de l'article contiennent la reconnaissance suivante de la contribution cruciale de Jean : « Nous sommes extrêmement reconnaissants à Jean Dalibard de nous avoir donné l'idée fondatrice de ce système de piégeage ».

Cette « idée fondatrice » a été traitée dans des livres [14] et des notes de cours d'écoles d'été [15]. L'idée est simple et puissante. Des faisceaux laser collimatés, contre-propageants, polarisés circulairement et d'hélicités opposées, éclairent le centre d'un champ magnétique quadripolaire sphérique [16]. Les atomes qui se meuvent dans un sens ou dans l'autre le long de l'axe de propagation du laser subissent un déplacement Zeeman et entrent en résonance avec le faisceau laser de la bonne polarisation qui les ramène vers le centre du piège. Le fait que le champ magnétique varie linéairement avec l'écart au centre du piège et qu'il change de direction lorsqu'on passe par le centre est une caractéristique essentielle.

Parmi les caractéristiques remarquables à la base de l'efficacité du PMO, on peut citer le fait que l'idée simple décrite ci-dessus à une dimension, et conçue à l'origine (et décrite en général [13, 14] et [15]) comme fonctionnant sur une transition $J = 0 \rightarrow J = 1$, fonctionne bien à trois dimensions et sur des systèmes de moment cinétique plus élevé $J \rightarrow J + 1$. Conçu à l'origine dans le contexte du refroidissement Doppler, le PMO fonctionne bien pour le refroidissement sub-Doppler et atteint régulièrement des températures sub-Doppler. Moi-même, ainsi que d'autres auteurs, avons décrit le PMO comme la « cheville ouvrière » du refroidissement et du piégeage par laser parce qu'il produit facilement des nuages d'atomes froids de grande taille (typiquement des centaines de micromètres ou des millimètres), avec des densités atomiques de l'ordre de quelques 10^{11} cm^{-3} , une densité qui est typiquement limitée par l'équilibre entre les pertes par collision et le taux de chargement, ainsi que par la répulsion effective entre atomes due à l'émission spontanée de photons et à leur réabsorption. Le taux de chargement peut être très élevé, compte tenu de la taille des faisceaux laser de piégeage (de l'ordre du centimètre) et du fort amortissement dû au refroidissement laser. Le chargement fonctionne si bien que le PMO peut capturer la partie la plus lente de la distribution de vitesse de Maxwell-Boltzmann d'une va-

peur en cellule, réalisant facilement ce que la mélasse optique (voir ci-dessus) peine à faire - produire un nuage dense d'atomes froids sans avoir à décélérer au préalable un faisceau atomique « chaud ». Les équations du mouvement simplifiées d'un atome dans un PMO correspondent à un oscillateur harmonique amorti [15], le processus du PMO fournissant la force de rappel et le refroidissement Doppler l'amortissement visqueux. Les paramètres de fonctionnement typiques font que l'oscillateur est suramorti.

De nombreuses publications décrivent les détails du fonctionnement réel du PMO, ainsi que les améliorations apportées à ce fonctionnement, et leur application à pratiquement tous les aspects de la physique des atomes froids. En donner une discussion sortirait du cadre de cet avant-propos historique. Le fait que de telles améliorations aient été possibles et que de telles applications aient été réalisées témoigne une fois de plus de la beauté et de la force de l'idée originelle. Aujourd'hui, presque toutes les expériences mettant en jeu le refroidissement d'atomes par laser (ce qui semble être le cas de la plupart des expériences en physique atomique, moléculaire et optique (PAMO)) utilisent un PMO pour produire le gaz d'atomes froids initial servant directement aux expériences ou à partir duquel on produit des nuages d'atomes encore plus froids et plus denses, atteignant souvent la dégénérescence quantique bosonique ou fermionique. L'utilisation d'un PMO pour charger des réseaux avec des atomes uniques piégés en vue d'applications dans le domaine de l'information quantique présente un intérêt particulier à l'heure actuelle.

Je pense qu'après celle du refroidissement laser [17, 18], l'invention du PMO est à la base du développement le plus important de la physique des atomes froids. Le PMO a véritablement révolutionné le domaine, en généralisant ce qui était autrefois une activité mineure de la PAMO. Même la découverte [19, 20] du refroidissement sub-Doppler (dont l'explication la plus satisfaisante est due à Jean Dalibard et Claude Cohen-Tannoudji [21]), qui a permis le fonctionnement efficace des premières horloges à fontaine atomique et l'obtention du premier condensat de Bose-Einstein atomique gazeux, n'était pas aussi importante, étant donné qu'aujourd'hui, certaines des expériences les plus importantes sur les atomes froids sont réalisées avec des atomes ne présentant pas de mécanisme de refroidissement sub-Doppler. Sans le PMO, je vois mal comment il aurait été possible d'atteindre la condensation de Bose-Einstein ou la dégénérescence fermionique dans les gaz atomiques, phénomènes qui sont le point de départ de nombreuses expériences parmi les plus passionnantes réalisées aujourd'hui dans le domaine des atomes froids.

Pour la richesse actuelle du domaine expérimental des gaz d'atomes froids, richesse qui a souvent été alimentée par les travaux de Jean Dalibard lui-même, nous devons remercier sa brillante et révolutionnaire invention du piège magnéto-optique, le PMO.

References

- [1] A. Ashkin, "Trapping of Atoms by Resonance Radiation Pressure", *Phys. Rev. Lett.* **40** (1978), p. 729-732.
- [2] J. Dalibard, C. Cohen-Tannoudji, "Dressed atom approach to atomic motion in laser light: The dipole force revisited", *J. Opt. Soc. B* **2** (1985), p. 1707-1720.
- [3] P. L. Gould, P. D. Lett, P. S. Julienne, W. D. Phillips, "Observation of Associative Ionization of Ultracold Laser-Trapped Sodium Atoms", *Phys. Rev. Lett.* **60** (1988), p. 788-792.
- [4] V. G. Minogin, "Theory of a radiative atomic trap", *Sov. J. Quantum Electron.* **12** (1982), p. 299-303.
- [5] V. G. Minogin, J. Javanainen, "A tetrahedral light pressure trap for atoms", *Opt. Comm.* **43** (1982), p. 119-122.
- [6] W. D. Phillips, H. Metcalf, "Laser Deceleration of an Atomic Beam", *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982), p. 596-599.
- [7] A. Ashkin, J. P. Gordon, "Stability of radiation-pressure particle traps: an optical Earnshaw theorem", *Opt. Lett.* **8** (1983), p. 511-513.
- [8] J. Dalibard, W. Phillips, "Stability and Damping of Radiation Pressure Traps", *Bull. Am. Phys. Soc.* **30** (1985), p. 748.
- [9] W. Phillips, J. Prodan, H. Metcalf, "Laser cooling and electromagnetic trapping of neutral atoms", *J. Opt. Soc. Am. B* **2** (1985), p. 1751-1767.
- [10] S. Chu, L. Hollberg, J. Bjorkholm, A. Cable, A. Ashkin, "Three-Dimensional Viscous Confinement and Cooling of Atoms by Resonance Radiation Pressure", *Phys. Rev. Lett.* **55** (1985), p. 48-51.

- [11] D. Pritchard, E. Raab, V. Bagnato, C. Wieman, R. Watts, "Light Traps Using Spontaneous Forces", *Phys. Rev. Lett.* **57** (1986), p. 310-313.
- [12] P. Bouyer, P. Lemonde, M. Ben Dahan, A. Michaud, C. Salomon, J. Dalibard, "An Atom Trap Relying on Optical Pumping", *Eur. Phys. Lett.* **27** (1994), p. 569-574.
- [13] E. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, D. Pritchard, "Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure", *Phys. Rev. Lett.* **59** (1987), p. 2631-2634.
- [14] H. Metcalf, P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping*, Graduate texts in contemporary physics, Springer, 1999 (see Section 11.4).
- [15] W. Phillips, "Laser cooling and trapping of neutral atoms", in *Laser Manipulation of Atoms and Ions* (E. Arimondo, W. D. Phillips, F. Strumia, eds.), North-Holland, Amsterdam, 1992, International School of Physics "Enrico Fermi", p. 317-325.
- [16] A. Migdall, J. Prodan, W. Phillips, T. Bergeman, H. Metcalf, "First Observation of Magnetically Trapped Neutral Atoms", *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985), p. 2596-2599.
- [17] T. Hänsch, A. Schawlow, "Cooling of gases by laser radiation", *Opt. Commun.* **13** (1975), p. 68-69.
- [18] D. Wineland, H. Dehmelt, "Proposed $10^{14} \Delta\nu < \nu$ laser fluorescence spectroscopy on Ti^+ mono-ion oscillator III", *Bull. Am. Phys. Soc.* **20** (1975), p. 637.
- [19] P. Lett, R. Watts, C. Westbrook, W. Phillips, P. Gould, H. Metcalf, "Observation of Atoms Laser Cooled below the Doppler Limit", *Phys. Rev. Lett.* **61** (1988), p. 169-172.
- [20] C. Salomon, J. Dalibard, W. Phillips, A. Clairon, S. Guellati, "Laser cooling of cesium atoms below 3 microkelvin", *Eur. Phys. Lett.* **12** (1990), p. 683-688.
- [21] J. Dalibard, C. Cohen-Tannoudji, "Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: simple theoretical models", *J. Opt. Soc. B* **6** (1989), p. 2023-2045.