Des premiers lasers à gaz carbonique aux interféromètres atomiques et moléculaires

Ch.J. Bordé*

LNE-SYRTE, UMR 8630 CNRS, Observatoire de Paris

61 avenue de l'Observatoire, 75 014 Paris, France

et

Laboratoire de Physique des Lasers, UMR 7538 CNRS, Université Paris Nord,

99 avenue J.-B. Clément, 93430 Villetaneuse, France

June 30, 2019

Abstract

The objective of this publication is to bring out the common thread that has guided me on a sometimes chaotic path from spectroscopy to atomic interferometry. The search for an ever-increasing resolving power has led spectroscopists to take into account the external motion of atoms and molecules. The usual Doppler broadening and then the relativistic Doppler effect could be accommodated with a classical treatment of this external motion. But the recoil effect has required to introduce explicitly momentum conservation between light and atoms. This has imposed to treat simultaneously internal and external degrees of freedom in a quantum way. The processes involved in the different spectroscopy methods then appeared as quantum interference phenomena between different space-time paths correlated with changes in the internal state of objects. These interferences are well represented by density matrix diagrams. The notion of atomic interferometer is made evident in these diagrams. The Ramsey separate field method can be interpreted as an interferometric process in the internal space of atoms and can be extended to the optical domain through an interference in the external space that cancels out the first-order Doppler effect. The new interferometers are inertial sensors together with clocks, with an external phase added to the internal phase. A unified description is naturally made in a five-dimensional space that combines these two aspects by adding the internal dimension represented by proper time to the external space-time. It offers a natural classification of interferometers from the metric tensor and its derivatives. As an example, we introduce the concept of a chiral interferometer to detect any chirality of space-time such as torsion.

Résumé

*Membre de l'Institut, Académie des Sciences; http://christian.j.borde.free.fr

L'objectif de cette publication est de faire émerger le fil conducteur qui m'a guidé sur un chemin parfois chaotique depuis la spectroscopie jusqu'à l'interférométrie atomique. La recherche d'un pouvoir de résolution toujours croissant a entraîné les spectroscopistes à prendre en compte le mouvement externe des atomes et des molécules. L'élargissement Doppler habituel puis l'effet Doppler relativiste pouvaient s'accommoder d'un traitement classique de ce mouvement externe. Mais l'effet de recul s'est imposé pour faire respecter la conservation de la quantité de mouvement entre atomes et lumière. Dès lors il était devenu impératif de traiter simultanément et de façon quantique les degrés de liberté internes et les degrés de liberté externes des atomes et molécules. Les processus impliqués dans les différentes méthodes de spectroscopie sont alors apparus comme des phénomènes d'interférence quantique entre différents chemins d'espace-temps corrélés avec les changements d'état interne des objets. Ces interférences sont bien représentées par des diagrammes de matrice densité. La notion d'interféromètre atomique est alors rendue manifeste dans ces diagrammes. La méthode des champs séparés de Ramsey peut être interprétée comme un processus interférométrique dans l'espace interne aux atomes qui peut être étendue au domaine optique grâce à une interférence dans l'espace externe qui annule l'effet Doppler du premier ordre. Les nouveaux interféromètres sont des senseurs inertiels en même temps que des horloges, une phase externe s'ajoutant à la phase interne. Une description unifiée se fait naturellement dans un espace à cinq dimensions qui combine ces deux aspects en ajoutant la dimension interne liée au temps propre à l'espace-temps externe. Elle offre une classification naturelle des interféromètres à partir du tenseur métrique et de ses dérivées. A titre d'exemple, on introduit ainsi le concept d'interféromètre chiral pour rechercher une propriété chirale de l'espace-temps telle que sa torsion .

1 Introduction: Le "Lamb dip" et ses conséquences

Dès leurs débuts les lasers à gaz carbonique se sont révélés extrêmement puissants avec un choix de fréquences particulièrement riche. Ces qualités ont tout de suite permis de dissocier de nombreuses molécules [1, 2, 3] ce qui a conduit plus tard à la séparation isotopique par laser. Par contre ils étaient très instables en fréquence et il fallut apprendre à les domestiquer et pour cela en comprendre toute la physique. Une théorie des lasers à gaz venait d'être publiée par le prix Nobel américain Willis Lamb [4] et elle prédisait un curieux phénomène: le "Lamb dip", une réduction brutale de la puissance au voisinage de l'accord avec la transition atomique. Cette résonance était très étroite et exempte de l'élargissement Doppler qui affecte en général toutes les raies spectrales que ce soit en émission ou en absorption. La présence de deux ondes se propageant en

sens opposés dans la cavité laser suffit pour sélectionner les atomes ne présentant pas de décalage Doppler. Le "Lamb dip" avait été observé pour le laser à He-Ne mais son existence était mise en question pour les molécules. J'ai pu montrer que ce phénomène se manifestait bien pour les lasers moléculaires (Figure 1) et qu'il permettait d'asservir la fréquence du laser en la calant au centre de cette résonance [5, 6]. Le problème de la stabilisation des lasers moléculaires trouvait ainsi une solution très satisfaisante et très générale.

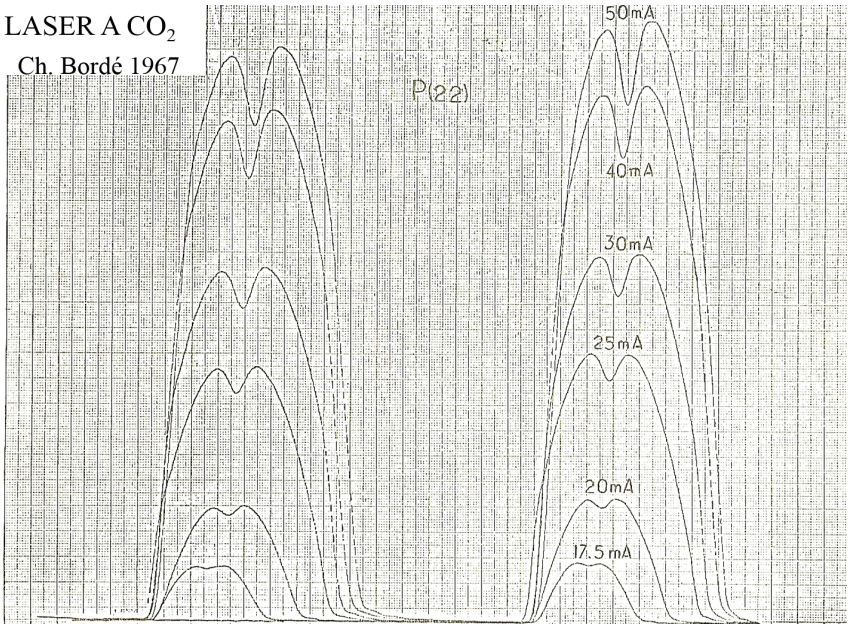


Figure 1: Puissance de sortie d'un laser à gaz carbonique sur la raie P(22) en fonction de la longueur de cavité pour différents courants d'excitation et une pression du milieu amplificateur égale à 300 μTorr. La longueur de cavité est directement liée à la fréquence et l'écart de fréquence entre modes adjacents est de 62,5 MHz [5, 6].

L'idée s'est imposée immédiatement de transposer la méthode en spectroscopie d'absorption qui butait depuis longtemps sur cette largeur Doppler. Ainsi est née la spectroscopie de saturation [7] et en quelques années le pouvoir de résolution c'est-à-dire la capacité à résoudre des détails dans le spectre fut multiplié par un million. Au fil de ce progrès nous avons pu découvrir avec émerveillement les subtiles partitions que nous jouaient les atomes à l'intérieur des molécules: derrière la structure fine de vibration-rotation nous avons découvert une structure superfine puis hyperfine puis superhyperfine [35], véritable musique des sphères liée au ballet des atomes dans les toupies symétriques telles que l'ammoniac [15] ou les toupies sphériques comme le méthane ou les hexafluorures. La figure 2 illustre ce pouvoir de résolution croissant pour la bande de vibration ν_3 de la molécule d'hexafluorure de soufre:

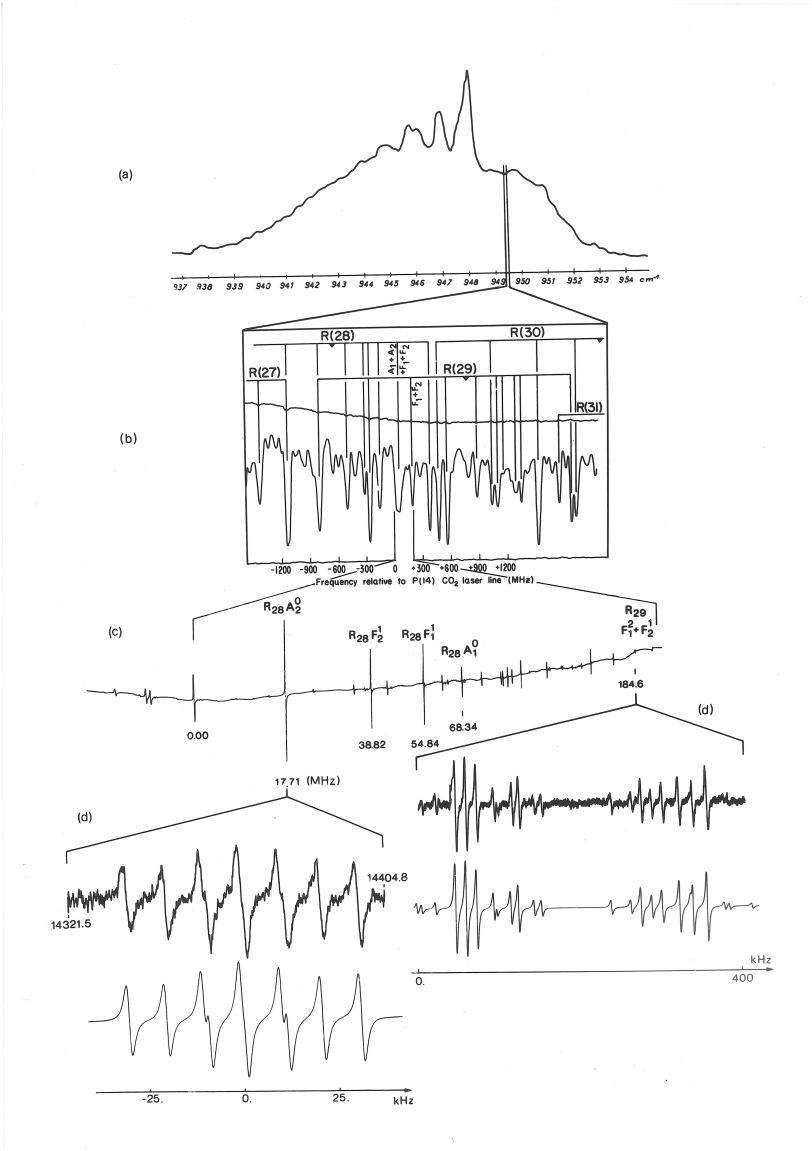


Figure 2: A la résolution la plus faible [spectre (a) du haut] on retrouve seulement l'enveloppe des branches P, Q et R enregistrées avec un spectromètre à grille de Girard de résolution 0,07 cm^{-1}. La structure fine tensorielle apparaît sur le spectre de diode laser (b) limité à la largeur Doppler. La structure superfine des amas R(28) A_1, F_1, F_2, A_2 et R(29) F_1, F_2 n'est résolue que sur le spectre d'absorption saturée (c) obtenu avec des lasers libres. Enfin, les structures hyperfines ne sont visibles que sur les spectres (d) obtenus avec contrôle électronique de la fréquence des lasers.

Il y avait un autre défi à relever: celui de voir les molécules reculer en bloc lors de l'émission ou de l'absorption de la lumière du laser. La théorie prévoyait un dédoublement de chaque raie de l'ordre du cent-milliardième de la fréquence laser. Pour observer une telle structure il fallait que les molécules pussent suivre l'oscillation laser pendant un temps très long et pour cela agrandir considérablement les faisceaux laser. Cela m'a permis, en collaboration avec le prix Nobel américain Jan Hall, d'observer cet échange extrêmement précis d'impulsion entre laser et molécules [8, 9, 10].

Pour bien comprendre ce phénomène de recul il faut considérer le mouvement des atomes ou des molécules non plus comme celui d'un objet classique, mais comme celui d'une onde, l'onde de de Broglie [11, 26, 43, 44]. L'effet du laser sur cette onde atomique est de la séparer en une onde défléchie et une onde transmise, tout comme une lame semi-réfléchissante, peut séparer la lumière en deux. Ici les rôles sont simplement inversés entre lumière et matière : c'est le laser qui divise en deux l'onde atomique. Cette séparatrice est cohérente en ce sens qu'elle ne brouille pas les ondes atomiques et cela a ouvert la voie à la réalisation d'interféromètres atomiques [12, 20, 22, 23, 45, 54]. La méthode a été ensuite étendue à la spectroscopie à deux photons [13, 46, 47, 54]. Une séparatrice crée deux ondes, une autre les recombine. À cause du très grand nombre d'oscillations de l'onde dans l'espace, une toute petite différence de chemin entre les deux trajets offerts à l'onde va résulter en une variation importante de l'intensité à la sortie de l'interféromètre. Par exemple une toute petite rotation est facilement détectable et ce sont déjà des interféromètres laser qui permettent de faire naviguer les avions. Pourquoi vouloir remplacer la lumière par une onde atomique? Tout simplement parce que l'énergie contenue dans chaque atome est plus grande que l'énergie d'un photon par un facteur cent milliards et que ce facteur entre directement dans la sensibilité des interféromètres aux propriétés de l'espace-temps [53]. La possibilité de mesures beaucoup plus précises permet des applications immédiates à la navigation des sous-marins, à la mesure de la rotation terrestre ou de la tectonique des plaques. De même les accélérations et en particulier celle de la pesanteur sont mesurées avec une très grande exactitude, rendant possible de suivre le détail des marées terrestres ou des tremblements de terre et de faire de la prospection minière. Enfin plusieurs effets de relativité générale deviennent accessibles [48, 49, 22, 50, 51, 53, 55, 56, 59, 61], et même la détection des ondes de gravitation [36] va pouvoir en bénéficier [23, 67].

Les assemblages d'atomes que sont les molécules sont aussi capables d'interférer comme je l'ai montré pour la première fois avec l'hexafluorure de soufre [29, 31, 33] puis avec la molécule d'iode [41]. Nos collègues Anton Zeilinger et Markus Arndt ont poursuivi l'exploration de cette frontière entre le monde quantique et le monde classique avec des molécules de plus en plus grosses [66, 65].

L'interférométrie atomique a bien d'autres applications comme la détermination précise des masses des atomes ou encore la réalisation d'horloges [19]. Il suffit de prendre des atomes dans un état interne différent sur chacun des deux

trajets[1]. Les horloges optiques que l'on sait ainsi réaliser sont maintenant bien meilleures que les horloges micro-ondes qui définissent l'unité de temps et on est obligé de repenser aujourd'hui la définition de la seconde. À un bout de la chaîne ces recherches sont enracinées dans l'héritage de de Broglie et d'Einstein. À l'autre, elles conduisent à de nouveaux outils pour l'exploration du monde et pas seulement sur Terre car à en juger par la multiplication des projets de missions spatiales qui les proposent [38, 39, 40, 59, 63], leur avenir est aussi dans l'Espace.

2 Spectroscopie de saturation et effet de recul

La spectroscopie de saturation permet donc de s'affranchir de l'élargissement Doppler des raies. C'est une méthode de spectroscopie non-linéaire en ce sens qu'elle requiert l'interaction d'un gaz avec deux ondes de même fréquence mais se propageant en sens opposés. En pratique le premier montage publié aux comptes-rendus [7] était le suivant:

[1] On verra plus loin comment la notion de trajet peut être étendue à la cinquième dimension que constitue le temps propre pour prendre en compte le mouvement interne des atomes.

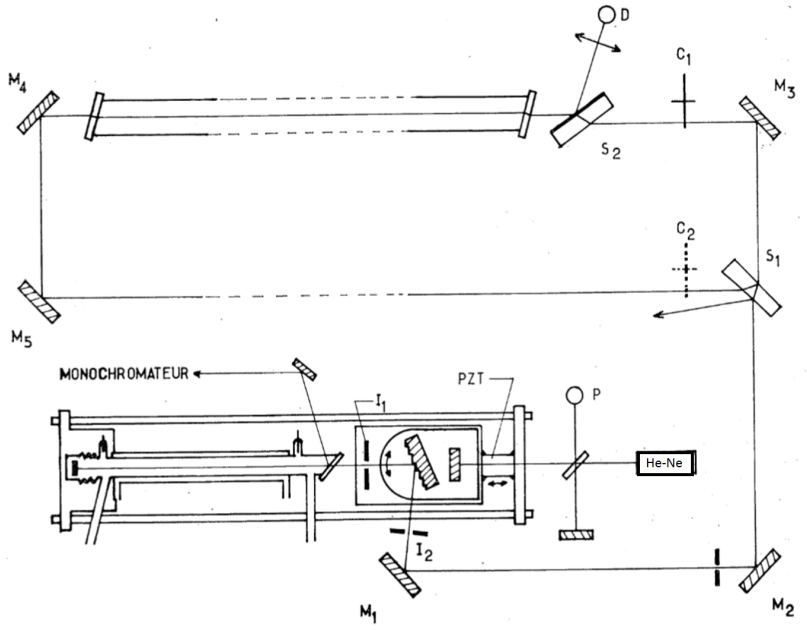


Figure 3: Le laser à gaz carbonique figuré ici comportait un réseau de diffraction externe au tube amplificateur et permettant d'extraire un faisceau de sortie. Les molécules situées dans une cuve d'absorption externe au laser étaient soumises à une onde de saturation forte (réfléchie par le miroir M_3 et modulée en amplitude par le hachoir C_1) et sondées par une deuxième onde beaucoup moins intense de direction opposée et réfléchie par la séparatrice S_2 vers le détecteur D. Cette méthode permet de sélectionner le seul signal de saturation (méthode de Bordé-Haensch) .

L'une au moins des deux ondes doit être assez intense pour modifier les populations des niveaux et saturer l'absorption ou la dispersion [16] de l'autre. Leur fréquence étant la même mais les décalages Doppler opposés pour des molécules en mouvement cette modification ne peut avoir lieu que pour le centre de la largeur Doppler des raies d'absorption ce qui correspond à une projection de la vitesse nulle sur l'axe optique. Ceci est illustré simplement sur la figure 4 où sont représentées les courbes donnant l' énergie en fonction de l'impulsion pour les deux niveaux atomiques impliqués.

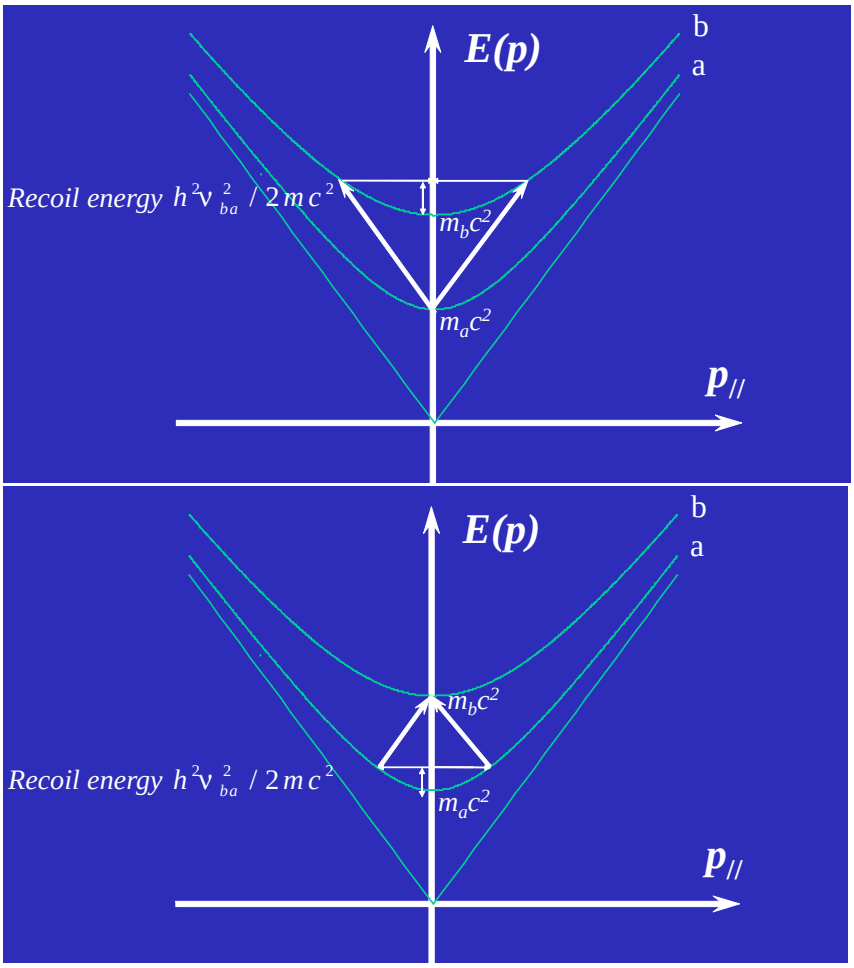


Figure 4: Diagrammes d'énergie-impulsion montrant les deux possibilités pour les molécules d'interagir simultanément avec deux ondes lumineuses se propageant en sens opposés.

Cette représentation met en évidence deux possibilités pour les mêmes molécules d'interagir avec les deux ondes optiques : la composante parallèle de l'impulsion est nulle soit dans le niveau inférieur soit dans le niveau supérieur. Ceci donne lieu aux deux composantes de recul des raies de saturation dont la fréquence diffère de $h\nu_{ba}^2/mc^2$ dédoublement illustré sur la figure 5 [10, 28].

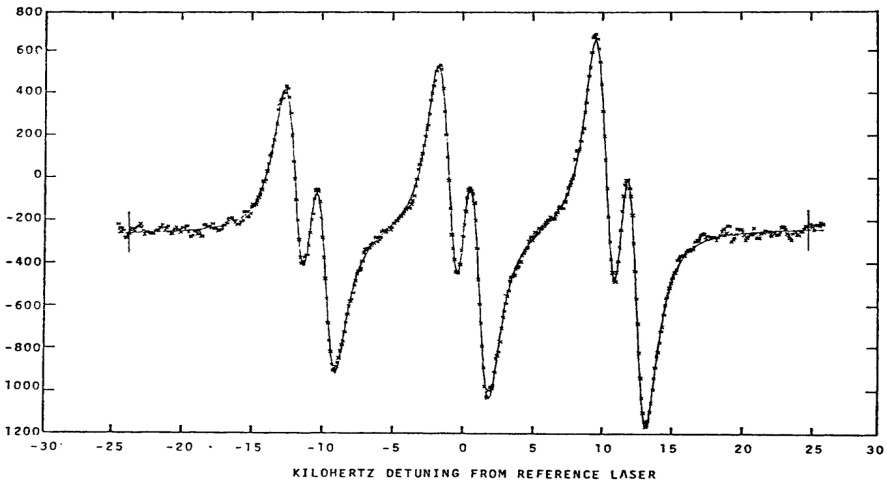


Figure 5: Composantes hyperfines de la raie du méthane à 3,39 μm dédoublées par effet de recul (2,16 kHz).

3 Diagrammes de matrice densité semi-classiques

Une autre représentation graphique très éclairante est fournie par les diagrammes de matrice densité figurant l'évolution temporelle des atomes. L'opérateur densité est l'outil privilégié de la mécanique statistique quantique, déjà utilisé par Willis Lamb pour sa théorie des lasers à gaz [4]. Il permet de décrire un ensemble statistique d'atomes en interaction avec la lumière. Il m'a permis de développer la théorie de la spectroscopie de saturation [14]. Il associe ket et bra sous la forme d'un projecteur avec la probabilité statistique de l'état correspondant.

$$\rho = \sum_{\psi} p_{\psi} \left|\psi\right\rangle \left\langle\psi\right|$$

L'évolution temporelle du système considéré peut ainsi être représentée par une double ligne verticale correspondant à chaque élément de matrice de cet opérateur et à leurs couplages mutuels successifs sous l'influence de la lumière. La dimension verticale correspond au temps propre et chaque vertex correspond généralement à un terme d'interaction au premier ordre et ces diagrammes sont donc perturbatifs. Les deux côtés représentent des processus différents et le diagramme complet représente donc une interférence quantique entre ces deux processus.

L'axe horizontal sera réservé à la dimension d'espace de propagation de la lumière. A titre de premier exemple le diagramme correspondant au processus d'absorption linéaire par un atome à deux niveaux a et b est donné sur la gauche de la figure 6:

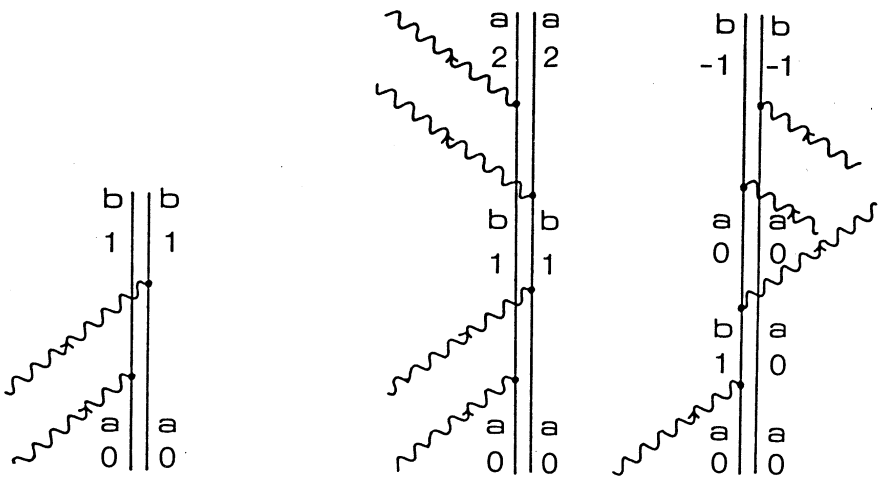


Figure 6: A gauche, le diagramme de matrice densité correspondant à l'absorption linéaire entre les niveaux d'énergie interne a et b. A droite, les deux diagrammes correspondant aux deux composantes de recul de l'absorption saturée. On a indiqué sur chacun des deux bras le nombre de quanta d'impulsion $\hbar k$ échangés avec le rayonnement.

Si les deux interactions se produisent dans deux zones de champ séparées dans le temps ou l'espace alors des franges de Ramsey apparaîtront sur le profil d'absorption. Ces franges ne font intervenir que les degrés de liberté internes à l'atome au travers de l'énergie interne (masse) de chaque niveau. La seule dimension impliquée dans le déphasage est le temps propre. Le mouvement externe des atomes entre néanmoins dans la phase du champ électromagnétique ramenée dans le référentiel propre des atomes. La méthode de Ramsey n'est donc pas utilisable dans le domaine optique avec des atomes libres [2] à cause de l'effet Doppler et doit être combinée avec une méthode de spectroscopie sans élargissement Doppler: spectroscopie d'absorption saturée ou à deux photons [25, 30, 34].

Les diagrammes correspondant à l'absorption saturée impliquent une succession d'interactions relatives à chacune des deux ondes de sens de propagation opposés. C'est la condition pour s'affranchir de l'effet Doppler. Des règles diagrammatiques simples permettent un calcul rapide des signaux spectroscopiques en tenant compte de la géométrie des faisceaux, de la dégénerescence des niveaux atomiques et des phénomènes de relaxation liés aux collisions et à l'émission spontanée [32, 26, 27].

[2] Une autre voie privilégiée aujourd'hui pour les horloges optiques consiste à piéger les atomes.

4 De la spectroscopie à l'interférométrie à cinq dimensions

Ces diagrammes rectilignes ne rendent pas bien compte visuellement des échanges de quantité de mouvement avec la lumière. Si on adopte une représentation montrant ces échanges à chaque vertex, alors la dimension interférométrique dans l'espace saute aux yeux. Cette idée a fait son chemin et a fini par s'imposer en 1989. La surface des interféromètres ainsi révélée conduit à un déphasage Sagnac par rotation mesuré dès 1991 [37].

On vérifie également que les déplacements liés au recul ont des signes opposés puisqu'ils correspondent à une énergie cinétique additionnelle sur l'un ou l'autre des deux bras qui s'ajoute soit à l'énergie du niveau fondamental soit à l'énergie du niveau excité.

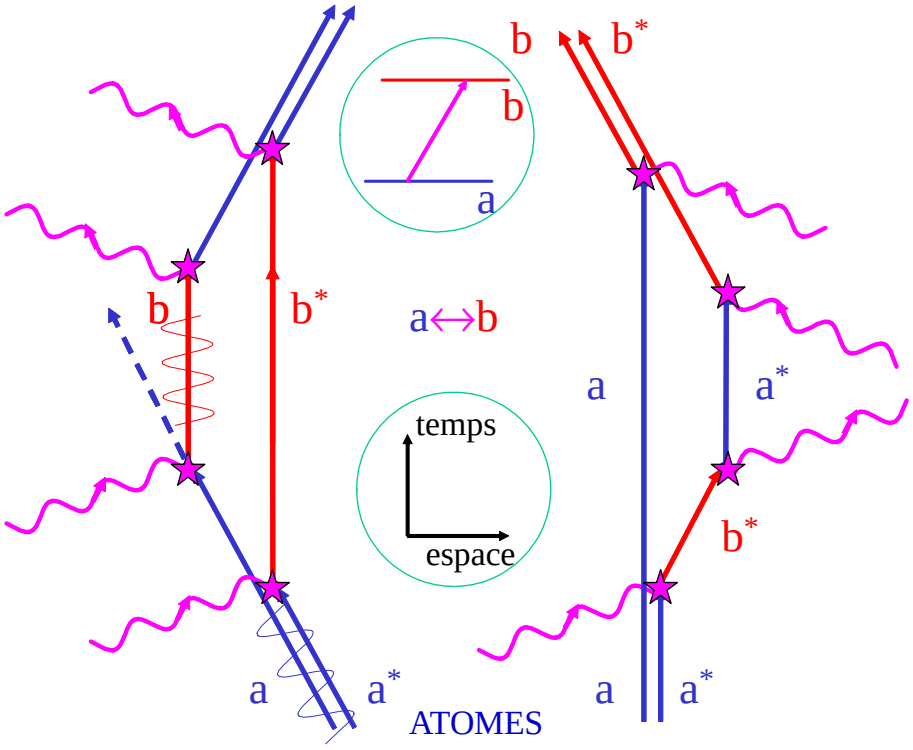


Figure 7: Diagrammes d'espace-temps pour l'absorption saturée avec prise en compte des échanges de quantité de mouvement avec la lumière et manifestant la structure interférométrique des deux processus (on a aussi fait figurer explicitement le caractère complexe conjugué des deux chemins).

Une autre retombée a été la mise en parallèle et finalement la combinaison des déphasages liés aux mouvements externes et ceux liés aux mouvements internes

et de suggérer une description et un formalisme unifiés dans un espace à 5 dimensions espace-temps-propre-temps. Les deux types de chemins optiques contribuent à une phase totale pour chaque particule composant l'atome ou la molécule. C'est cette phase totale qui doit s'annuler (modulo 2π) pour que l'interférence de chaque particule avec elle-même soit constructive.

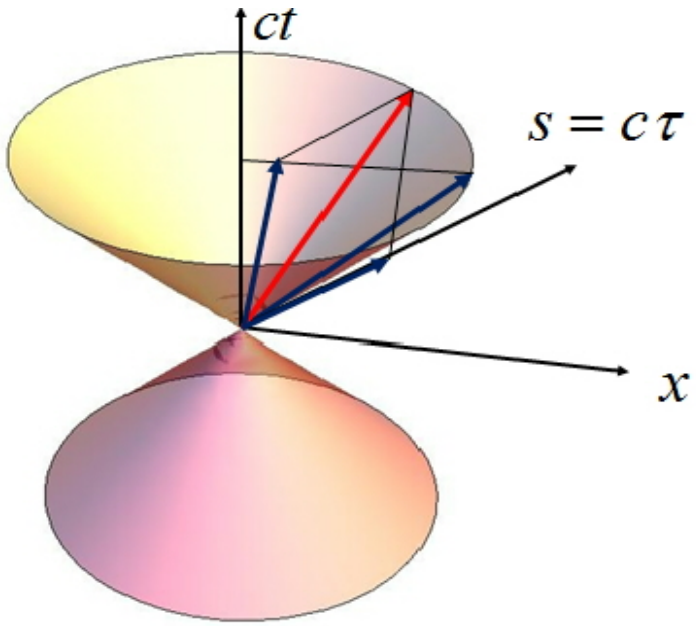


Figure 8a: Représentation à 5D espace-temps propre-temps coordonnée

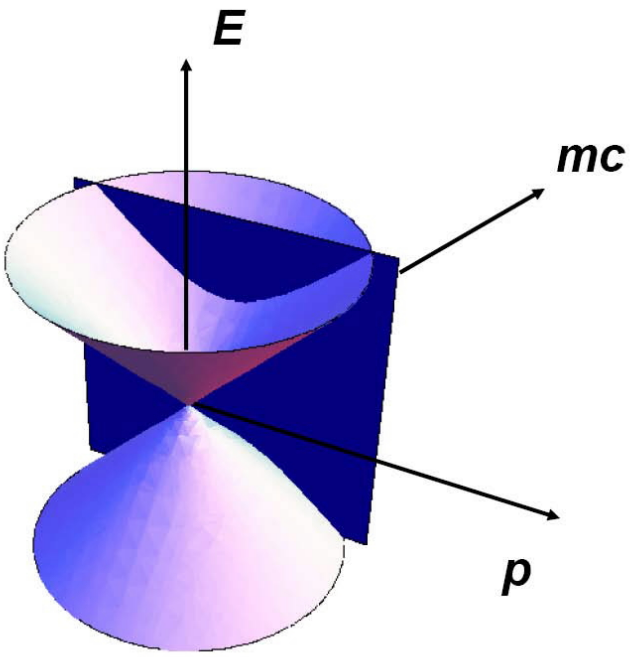


Figure 8b: Représentation à 5D énergie-masse-quantité de mouvement

Le terme d'interférométrie a pris tout son sens avec cette extension à l'espace externe à l'instar de l'interférométrie optique. Norman Ramsey a accueilli cette généralisation avec enthousiasme comme le montre son commentaire ci-joint.

HARVARD UNIVERSITY

DEPARTMENT OF PHYSICS

LYMAN LABORATORY OF PHYSICS
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02138

Thanks very much for your note of congratulations and your fascinating paper on atomic interferometry. I hope someone will do the experiments.

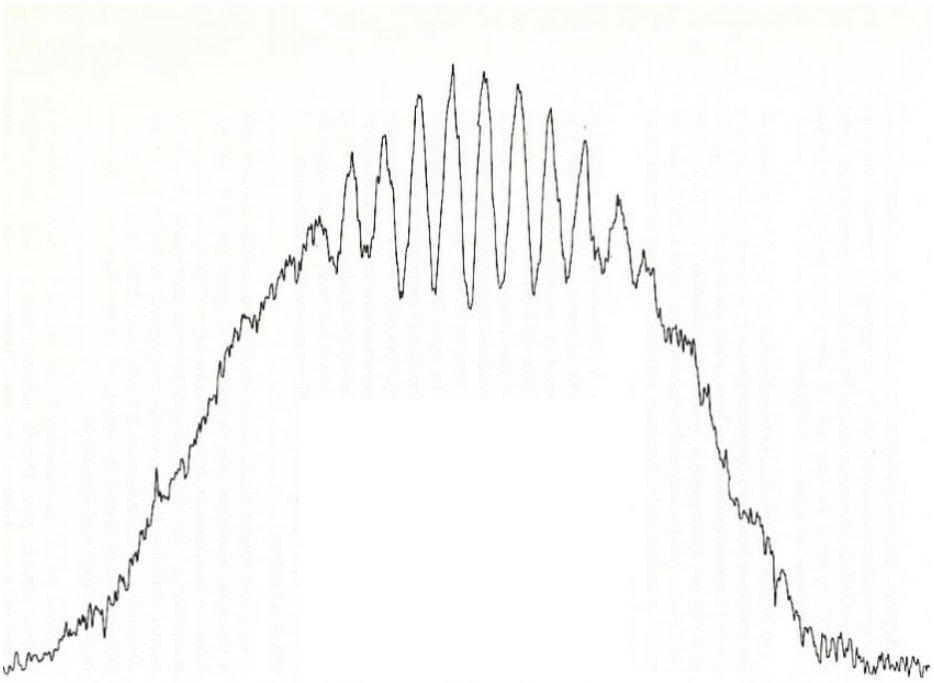
Sincerely,

Norman

Norman F. Ramsey

Nobel Prize1989

Parmi les premiers interféromètres de ce type généralisant la méthode de Ramsey à l'optique nous avons montré qu'on pouvait utiliser des molécules [29]. Les figures suivantes illustrent le cas de l'hexafluorure de soufre et celui de l'iode.



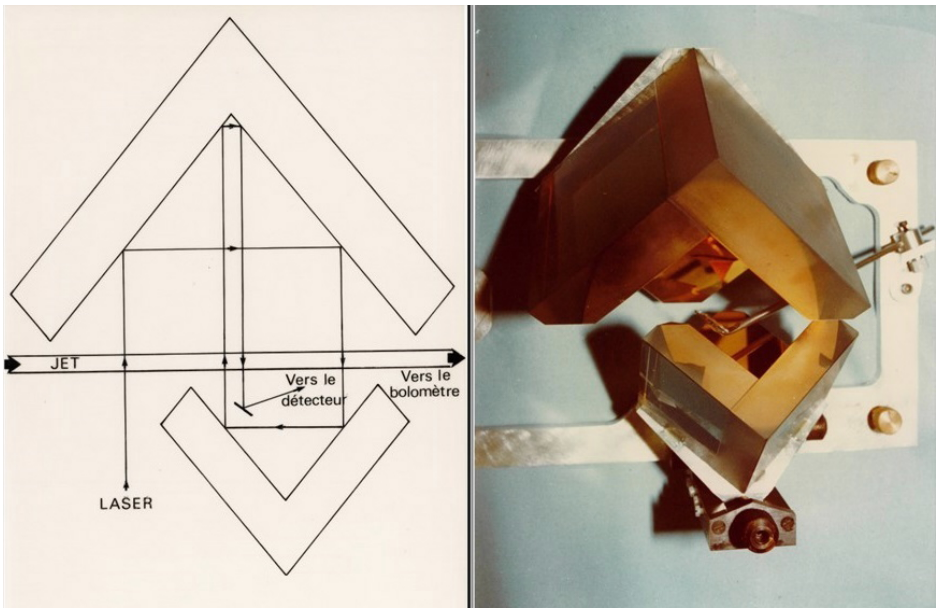


Figure 9: Interférométrie de Bordé-Ramsey utilisant un jet supersonique d'hélium ensemencé par des molécules d'hexafluorure de soufre [29]. En haut le signal et en bas le système optique utilisé.

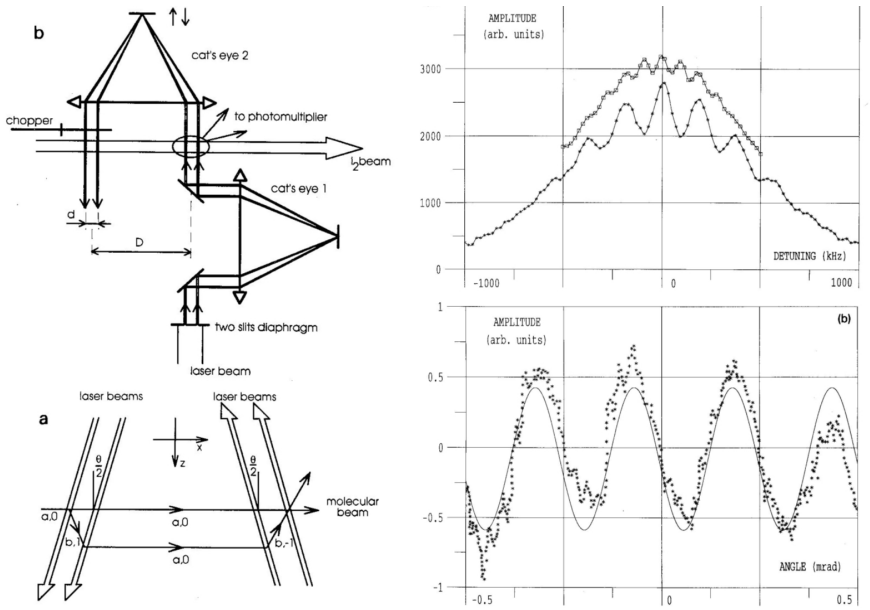


Figure 10: Interféromètre de Bordé-Ramsey utilisant un jet supersonique d'iode [41]. Les franges du haut sont obtenues en faisant varier la fréquence et celles du bas en jouant sur l'angle des paires de faisceaux laser.

5 Applications et retombées

Nous avons déjà évoqué dans l'introduction beaucoup d'applications de l'interférométrie atomique. La géométrie à cinq dimensions en permet une classification systématique à partir du tenseur métrique et de ses dérivées qui apparaissent dans la connexion et le tenseur de courbure.

On peut donner à ces interféromètres beaucoup de configurations différentes qui les rendent sensibles à un effet spécifique: inertiel, gravitationnel ou électromagnétique [51]. Beaucoup de ces effets ont déjà fait l'objet d'études approfondies: Sagnac [37, 52, 57, 58, 60, 64], Aharonov-Casher,....[20, 19]. La littérature consacrée à l'interférométrie atomique est aujourd'hui considérable et le lecteur en trouvera une revue didactique dans [20, 21]. D'autres géométries restent à explorer comme, par exemple, une géométrie chirale qui permettrait de rechercher, par exemple, une torsion de l'espace-temps. Avec cet objectif on pourra jouer sur le spin des atomes ou des molécules, l'introduction d'un spin quelconque ne posant pas de difficultés mais on pourra aussi utiliser une molécule chirale dans l'interféromètre ou enfin donner à l'interféromètre une géométrie chirale en sortant du plan avec des faisceaux laser orthogonaux pour les séparatrices.

Le domaine de la métrologie fondamentale est bouleversé par les apports de

l'interférométrie des ondes de matière [17, 18, 62]: mesures de h/m et de la constante de structure fine [68, 70], horloges optiques [69], métrologie électrique [72] et l'impact sur le système d'unités est considérable ne serait-ce que par l'introduction de la constante de Planck pour définir l'unité de masse. Même la détermination directe de la constante de Boltzmann k via la largeur Doppler peut être décrite comme une mesure de décohérence thermique [42, 24, 74]. L'interférométrie qu'elle soit optique ou à ondes de matière est devenue une méthode universelle de mesure des grandeurs physiques [75].

References

[1] Ch. J. BORDÉ, A. HENRY et L. HENRY, Emission du gaz ammoniac excité par le rayonnement d'un laser à gaz carbonique, C.R. Acad. Sc. Paris, 262B, 1389-1390 (1966).

[2] Ch. J. BORDÉ, A. HENRY et L. HENRY, Comportement de différents gaz soumis au rayonnement d'un laser à gaz carbonique, C.R. Acad. Sc. Paris, 263B, 619 (1966).

[3] C. COHEN, Ch. J. BORDÉ et L. HENRY, Action d'un laser à gaz carbonique sur différents hydrocarbures gazeux insaturés, C.R. Acad. Sc. Paris, 265B, 267 (1967).

[4] Willis E. LAMB JR., Theory of an Optical Maser, Phys.Rev.143A, 1429 (1964).

[5] Ch. J. BORDÉ et L. HENRY, Stabilisation d'un laser à gaz carbonique et observation du phénomène de "Lamb dip" pour les transitions laser vers 10 um, C.R. Acad. Sc. Paris, 265B, 1251-1254 (1967).

[6] Ch.J. BORDÉ et L. HENRY, Study of the Lamb dip and of rotational competition in a carbon dioxide laser, J. of Quantum Electronics QE-4, 874-880 (1968).

[7] Ch.J. BORDÉ, Spectroscopie d'absorption saturée de diverses molécules au moyen des lasers à gaz carbonique et à protoxyde d'azote, C.R. Acad. Sc. Paris, 271B, 371-374 (1970).

[8] Ch. J. BORDÉ and J.L. HALL, Ultrahigh resolution saturated absorption spectroscopy, dans Laser Spectroscopy, édité par A. Mooradian et R. Brewer (Plenum Press, New York 1973), pp. 125-142.

[9] J.L. HALL and Ch.J. BORDÉ, Direct resolution of the recoil doublets using saturated absorption techniques, Bull. Amer. Phys. Soc., **19**, 1196 (1974).

[10] J.L. HALL, Ch. J. BORDÉ and K. UEHARA, Direct optical resolution of the recoil effect using saturated absorption spectroscopy, Phys. Rev. Letters, **37**, 1339-1342 (1976).

[11] Ch.J. BORDÉ, Sur l'effet de recul en spectroscopie d'absorption saturée, C.R. Acad. Sc. Paris, 283B, 181-184 (1976).

[12] Ch.J. BORDÉ, *Atomic interferometry with internal state labelling*, Phys. Lett., **A140**, 10-12 (1989).

[13] Ch.J. BORDÉ, Forme de raie en spectroscopie à deux quanta sans élargissement Doppler, C.R. Acad. Sc. Paris, 282B, 341-344 (1976).

[14] Ch. J. BORDÉ, J.L. HALL, C.V. KUNASZ and D.G. HUMMER, Saturated absorption line shape : Calculation of the transit-time broadening by a perturbation approach, Phys. Rev. 14, 236-263 (1976).

[15] M. OUHAYOUN et Ch.J. BORDÉ, Etude de l'effet Stark sur une transition de vibration-rotation de l'ammoniac par spectroscopie d'absorption saturée, C.R. Acad. Sc. Paris, 274B, 411-414 (1972).

[16] Ch.J. BORDÉ, G. CAMY, B. DECOMPS et L. POTTIER, Mise en évidence expérimentale du phénomène de dispersion saturée dans l'iode à 514,5 nm, C. R. Acad. Sc. Paris, 277B, 381-383 (1973).

[17] Ch.J. BORDÉ, *Métrologie fondamentale: unités de base et constantes fondamentales,* C.R. Physique **5**, 813-820 (2004).

[18] Ch.J. BORDÉ, *Base units of the SI, fundamental constants and modern quantum physics,* Phil. Trans. Roy. Soc., **363**, 2177-2202 (2005) p. 2182.

[19] Ch.J. BORDÉ, *Atomic clocks and inertial sensors*, Metrologia, 39 (5) 435-463 (2002).

[20] *Atom Interferometry*, ed. P. Berman, Academic Press (1997).

[21] Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi" - COURSE CLXXXVIII Atom Interferometry (2014).

[22] Ch. J. BORDÉ, *Matter-wave interferometers: a synthetic approach*, in [20] pp. 257-292.

[23] Ch. J. BORDÉ, *Atom interferometry using internal excitation: Foundations and recent theory*, International School of Physics "Enrico Fermi" - COURSE CLXXXVIII Atom Interferometry (2014) 143-170.

[24] Ch. J. BORDÉ, *On the theory of linear absorption line shapes in gases*, C. R. Physique 10, 866–882 (2009).

[25] Ch. J. BORDÉ, Sur les franges de Ramsey en spectroscopie sans élargissement Doppler, C.R. Acad. Sc. Paris, 284B, 101-104 (1977).

[26] J. BORDÉ et Ch. J. BORDÉ, Influence de la dégénérescence des niveaux sur les intensités des composantes d'effet de recul en spectroscopie de saturation, C.R. Acad. Sc. Paris, 285B, 287 (1977).

[27] J. BORDÉ and Ch. J. BORDÉ, Theory of relative intensities of hyperfine components in saturation spectroscopy, J. of Molecular Spectroscopy, 78, 353-378 (1979).

[28] Ch. J. BORDÉ, G. CAMY et B. DECOMPS, Measurement of the recoil shift of saturation resonances of I2 at 514.5 nm: a test of accuracy for high resolution saturation spectroscopy, Physical Review 20A, 254-268 (1979).

[29] Ch. J. BORDÉ, S. AVRILLIER, A. VAN LERBERGHE, Ch. SALOMON, D. BASSI and G. SCOLES, Observation of optical Ramsey fringes in the 10 mum spectral region using a supersonic beam of SF6, Journal de Physique Colloques, 42, C8-15-C8-19 (1981).

[30] Ch. SALOMON, Ch. BRÉANT, Ch. J. BORDÉ and R.L. BARGER, Ramsey fringes using transitions in the visible and 10 μm spectral regions : experimental methods, Journal de Physique Colloques, 42, C8-3-C8-14 (1981).

[31] Ch. J. BORDÉ, S. AVRILLIER, A. VAN LERBERGHE, Ch. SALOMON, Ch. BRÉANT, D. BASSI and G. SCOLES, Observation of optical Ramsey fringes in the 10 μm spectral region using a supersonic beam of SF6, Appl. Phys. B28, 82 (1982) p. 368-374.

[32] Ch. J. BORDÉ, Density matrix equations and diagrams for high resolution non-linear laser spectroscopy. Application to Ramsey fringes in the optical domain, in Advances in Laser Spectroscopy, edited by H. Walther, F. Strumia and T. Arrecchi, Plenum Press 1983, pp 1-70.

[33] Ch. SALOMON, S. AVRILLIER, A. VAN LERBERGHE and Ch. J. BORDÉ, Direct optical detection of Ramsey fringes in a supersonic beam of SF6, in Laser Spectroscopy VI, eds H.P. Weber and W.Luthy, Springer Verlag (1983) pp.150-160.

[34] Ch. J. BORDÉ, S. AVRILLIER, Ch. SALOMON, A. VAN LERBERGHE, Ch. BRÉANT, D. BASSI and G. SCOLES, Optical Ramsey fringes with travelling waves, Phys. Rev. A30, 1836-1848 (1984).

[35] Ch. J. BORDÉ, J. BORDÉ, Ch. BRÉANT, Ch. CHARDONNET, A. VAN LERBERGHE and Ch. SALOMON, Internal dynamics of simple molecules revealed by the superfine and hyperfine structures of their infrared spectra, in Laser Spectroscopy VII, eds T.W. Haensch and Y.R. Shen, Springer Verlag (1985) pp.108-114.

[36] Ch. J. BORDÉ, Méthodes optiques de détection des ondes gravitationnelles, Ann. Phys. Fr., 10, R1-R2 (1985).

[37] F. RIEHLE, Th. KISTERS, A. WITTE, J. HELMCKE and Ch. J. BORDÉ, Optical Ramsey Spectroscopy in a Rotating Frame: Sagnac Effect in a Matter-Wave Interferometer, Physical Review Letters 67, 177-180 (1991).

[38] P. WOLF, Ch. J. BORDÉ, et al., Quantum Physics Exploring Gravity in the Outer Solar System: The Sagas Project, arXiv:0711.0304 and Experimental Astronomy 23:651–687 (2009).

[39] W. ERTMER, M. GILOWSKI, S. JOLLENBECK, E.M. RASEL, C. SCHUBERT, T. WUBBENA, T. WENDRICH, M. ZAISER,T.V. ZOEST, Ch. J. BORDÉ, et al., Matter Wave Explorer of Gravity, Experimental Astronomy 23:611–649 (2009).

[40] G. AMELINO-CAMELIA, K. APLIN, M. ARNDT, J.D. BARROW, R.J. BINGHAM, Ch. J. BORDÉ, et al., GAUGE: the Grand Unification and Gravity Explorer, Experimental Astronomy 23:549–572 (2009).

[41] Ch. J. BORDÉ, N. COURTIER, F. du BURCK, A.N. GONCHAROV, M. GORLICKI, Molecular Interferometry Experiments, Physics Letters A188, 187-197 (1994).

[42] K. DJERROUD, C. LEMARCHAND, A. GAUGUET, C. DAUSSY, S. BRIAUDEAU, B. DARQUIÉ, O. LOPEZ, A. AMY-KLEIN, C. CHARDONNET, Ch. J. BORDÉ, Measurement of the Boltzmann constant by the Doppler broadening technique at a $3.8.10^{-5}$ accuracy level, C. R. Physique 10, 883–893 (2009).

[43] Ch.J. BORDÉ, The Physics of Optical Frequency Standards Using Saturation Methods, in: Frequency Standards and Metrology, A. de Marchi (Ed.) Springer-Verlag (1989) 196-205

[44] Ch. J. BORDÉ, Propagation of Laser beams and of atomic systems, Les Houches Lectures, Session LIII, 1990, in: Fundamental Systems in Quantum Optics, J. Dalibard, J.-M. Raimond and J. Zinn-Justin, eds, Elsevier Science Publishers, 1992.

[45] Ch. J. BORDÉ, Atomic Interferometry and Laser Spectroscopy, in: Laser Spectroscopy X, World Scientific (1991) pp. 239-245

[46] Ch. J. BORDÉ, M. WEITZ and T.W. HÄNSCH, New optical interferometers for precise measurements of recoil shifts. Application to atomic hydrogen, in Laser Spectroscopy, L. Bloomfield, T. Gallagher and D. Larson eds, American Institute of Physics (1994) pp. 76-78.

[47] A.F. LINSKENS, W.L. MEERTS, J. REUSS and Ch. J. BORDÉ, Doppler-free two-photon Ramsey fringes in the 10 mum region, in Laser Controlled Dynamics of Molecular Processes, 101-121, Nijmegen (1994).

[48] Ch. J. BORDÉ und C. LÄMMERZAHL, Atominterferometrie und Gravitation, Physikalische Blatter, 238-240 (Mars 1996).

[49] Ch. J. BORDÉ, Atomic and molecular interferometers: From basic concepts to applications as field sensors, dans Frequency Standards and Metrology, édité par J. Bergquist, World Scientific, (1996) pp. 211-222.

[50] Ch. J. BORDÉ, Quantum theory of clocks and of gravitational sensors using atom interferometry, in Laser Spectroscopy, Proceedings of the 14th International Conference on Laser Spectroscopy, Eds. R. Blatt, J. Eschner, D. Leibfried and F. Schmidt-Kaler, World Scientific, Singapore (1999) pp. 160-169.

[51] Ch. J. BORDÉ, J.-C. HOUARD and A. KARASIEWICZ, Relativistic phase shift for Dirac particles interacting with weak gravitational fields in matter-wave interferometers, in: Gyros, Clocks and Interferometers: Testing relativistic gravity in space, editors C. LÄMMERZAHL, C.W.F. EVERITT and F.W. HEHL, Springer-Verlag (2000) pp. 403-438 et gr-qc/0008033.

[52] D. HOLLEVILLE, J. FILS, P. PETIT, N. DIMARCQ, A. CLAIRON, P. BOUYER, Ch. J. BORDÉ and Ch. SALOMON, Réalisation d'un gyromètre à atomes froids, Journal de Physique IV, 10, 171-172 (2000).

[53] Ch.J. BORDÉ, Theoretical tools for atom optics and interferometry, C.R. Acad. Sci. Paris, t.2, Série IV, 509-530 (2001).

[54] T. HEUPEL, M. MEI, M. NIERING, B. GROSS, M. WEITZ, T.W. HÄNSCH and Ch.J. BORDÉ, Hydrogen atom interferometer with short light pulses, Europhysics Lett., 57, 158-163 (2002).

[55] Ch. J. BORDÉ, Atomic Clocks and Atom Interferometry, in " Advances in the Interplay between Quantum and Gravity Physics" , Ed. by P.G. Bergmann and V. de Sabbata, Kluwer Academic Publishers (2002) pp. 27-55.

[56] Ch. J. BORDÉ, Quantum Theory of Atom-Wave Beam Splitters and Application to Multidimensional Atomic Gravito-Inertial Sensors, General Relativity and Gravitation 36, 475-502 (2004).

[57] F. LEDUC, D. HOLLEVILLE, J. FILS, A. CLAIRON, N. DIMARCQ, A. LANDRAGIN, P. BOUYER and Ch. J. BORDÉ, Cold atom gyroscope for precision measurements, in Laser Spectroscopy, eds P. Hannaford, A. Sidorov, H. Bachor and K. Baldwin, World Scientific (2004) pp 68-70.

[58] F. LEDUC, B. CANUEL, D. HOLLEVILLE, N. DIMARCQ, A. CLAIRON, J. FILS, Ph. BOUYER, Ch. J. BORDÉ et A. LANDRAGIN, Interféromètre à atomes froids: vers un gyromètre-accéléromètre de grande sensibilité, J. Phys. IV France, 119, 225-226 (2004).

[59] Ch. J. BORDÉ, C. LÄMMERZAHL and E. RASEL, HYPER, " General Relativity and Gravitation 36, Issue 10, pp 2193-2196 (2004).

[60] B. CANUEL, F. LEDUC, D. HOLLEVILLE, A. GAUGUET, J. FILS, A. VIRDIS, A. CLAIRON, N. DIMARCQ, Ch. J. BORDÉ, A. LANDRAGIN and P. BOUYER, Six-Axis Inertial Sensor Using Cold-Atom Interferometry, Phys. Rev. Lett. 97, 010402-1 (2006).

[61] P. BOUYER, F. PEREIRA DOS SANTOS, A. LANDRAGIN and Ch. J. BORDÉ, Atom Interferometric Inertial Sensors for Space Applications, Lasers, Clocks and Drag-Free: Exploration of Relativistic Gravity in Space, Editors H. Dittus, C. Laemmerzahl and S. G. Turyshev, Springer 2006.

[62] Ch. J. BORDÉ, La réforme du système d'unités, La lettre de l'Académie des sciences, n° 20, 21-27 (2007).

[63] G. M. TINO, L. CACCIAPUOTI, K. BONGS, Ch. J. BORDÉ, P. BOUYER, H. DITTUS, W. ERTMER, A. GORLITZ, M. INGUSCIO, A. LANDRAGIN, P. LEMONDE, C. LAEMMERZAHL, A. PETERS, E. RASEL, J. REICHEL, C. SALOMON, S. SCHILLER, W. SCHLEICH, K. SENGSTOCK, U. STERR, M. WILKENS, Atom interferometers and optical atomic clocks: New quantum sensors for fundamental physics experiments in space , Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 166 , 159-165 (2007).

[64] Ch. J. BORDÉ, 5D optics for atomic clocks and gravito-inertial sensors, European Physical Journal Special Topics, 163 , 315-332 (2008).

[65] Christian Brand, Sandra Eibenberger, Ugur Sezer, Markus Arndt, Matter-wave physics with nanoparticles and biomolecules, Contribution to Les Houches Summer School, Session CVII - Current Trends in Atomic Physics, July 2016.

[66] Markus Arndt, Nadine Dörre, Sandra Eibenberger, Philipp Haslinger, Jonas Rodewald, Klaus Hornberger, Stefan Nimmrichter, Marcel Mayor Matter-wave interferometry with composite quantum objects, arXiv:1501.07770 [quant-ph].

[67] Rémi Geiger, Future Gravitational Wave Detectors Based on Atom Interferometry, in: "An Overview of Gravitational Waves: Theory and Detection", edited by G. Auger and E. Plagnol (World Scientific, 2017).

[68] Pierre Cladé, François Nez, François Biraben, Saïda Guellati-Khelifa, State of the art in the determination of the fine structure constant and the ratio h/m_u, arXiv:1901.01990 [physics.atom-ph] and Comptes rendus Physique , Vol 20 - N° 1-2, p77-91, 2019 and references therein.

[69] Sébastien Bize, The unit of time: Present and future directions, Comptes rendus Physique , Vol 20 - N° 1-2, p153-168, 2019 and references therein.

[70] B. YOUNG, M. KASEVICH and S. CHU, Precision atom interferometry with light pulses, p. 363-406 in [20].

[71] U. STERR et al, Atom interferometry based on separated light pulses, p. 293-362 in [20].

[72] Wilfrid Poirier, Sophie Djordjevic, Félicien Schopfer, Olivier Thévenot, The ampere and the electrical units in the quantum era, Comptes rendus Physique , Vol 20 - N° 1-2, p92-128, 2019 and references therein.

[73] Special issue on "The new International System of Units, Comptes rendus Physique , Vol 20 - N° 1-2, 2019.

[74] L. PITRE, M.D. PLIMMER, F. SPARASCI and M.E. HIMBERT, Determinations of the Boltzmann constant, p. 129-139 in [73].

[75] Ch. J. BORDÉ, A consistent unified framework for the new system of units: Matter-wave optics, p. 22-32 in [73].