

Condensation de Bose-Einstein et métrologie : Horloge à atomes piégés sur puce

La métrologie n'a de cesse de repousser toujours plus loin les limites de la mesure. Entre la redéfinition des unités du SI et plus généralement les besoins croissants en terme d'exactitude et de précision, la science de la mesure se tourne vers les résultats les plus récents et innovants des sciences et tout particulièrement ceux de la physique. Ainsi, ce sont les résultats de chercheurs récompensés par les prix Nobel qui aujourd'hui nourrissent la métrologie de demain. Après l'emploi de l'effet Hall quantique découvert par K. von Klitzing pour conserver l'Ohm, après celui du refroidissement d'atomes découvert notamment par C. Cohen-Tannoudji pour révolutionner la métrologie des fréquences, c'est au tour des condensats de Bose-Einstein d'apporter de nouvelles perspectives. Ce présent dossier traite de la réalisation d'un condensat, et de son rapprochement avec le monde de la mesure, en particulier celui de la métrologie des fréquences.

I. Interaction entre photon et matière

La matière est constituée d'atomes qui sont eux mêmes constitués d'un noyau, composé de protons et de neutrons, entouré d'électrons répartis par niveaux d'énergie. Sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique incident de fréquence ν , un atome, initialement dans son état d'énergie fondamental, absorbe un photon d'énergie $h\nu$ (où h est la constante de Planck) et passe dans un état d'énergie excité tout en subissant un mouvement de recul (du au fait que l'atome reçoit la quantité de mouvement que possède le photon) dans la même direction que celle du photon. Toutefois, cet état d'énergie excité est instable et l'atome ne tarde pas à retomber dans son état d'énergie fondamental en émettant un photon de fluorescence dans n'importe quelle direction de l'espace. Par ailleurs, simultanément à l'émission de ce photon de fluorescence, l'atome subit un mouvement de recul dans la direction opposée à celle de ce photon. Ce phénomène est d'autant plus efficace que l'énergie du photon incident est proche de la différence d'énergie entre un état excité et l'état fondamental de l'atome. On dit que la fréquence de la lumière employée est résonnante avec une transition atomique de l'atome considéré (cela nécessite donc de disposer des sources lumineuses présentant la longueur d'onde adaptée à la transition atomique de l'atome). Ces conditions associées à une intensité lumineuse suffisante permettent à la lumière d'exercer une action très remarquable sur l'atome.

La figure 1 schématise ce comportement et l'évolution de la population en électrons entre un niveau excité et le niveau fondamental de l'atome lors d'une interaction entre un photon et cet atome.

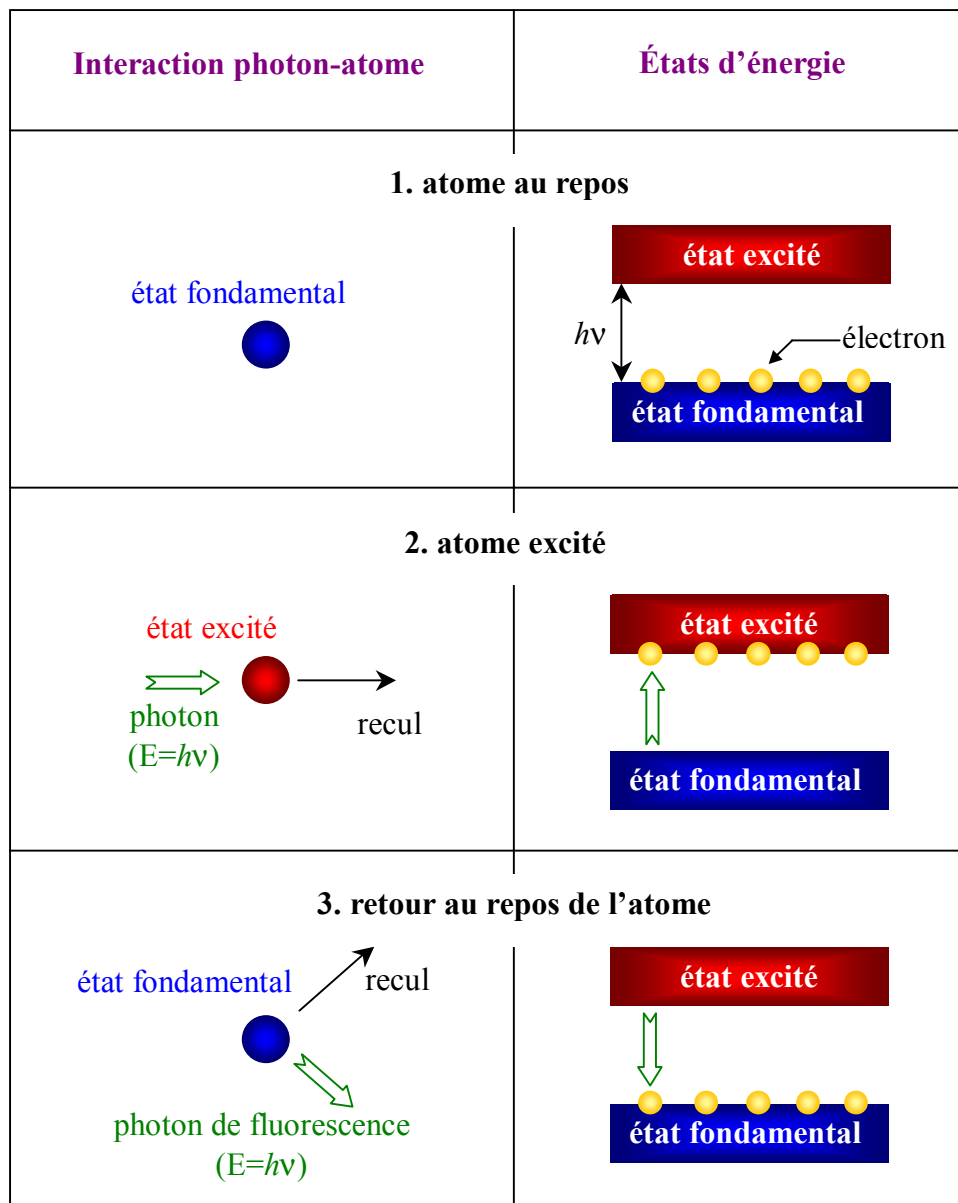


Fig. 1 : Comportement d'un atome lors d'une interaction entre ce dernier et un photon.

II. Qu'est ce qu'un condensat de Bose-Einstein ?

L'apparition d'un condensat de Bose-Einstein est liée à la notion d'indiscernabilité d'un gaz de particules soumis à une très basse température. Historiquement (en 1924), cette découverte, d'un point de vue théorique, revient à A. Einstein qui approfondit la notion d'indiscernabilité des particules que S. Bose avait appliqué aux photons pour décrire la loi de

Planck décrivant le spectre du corps noir. Ainsi A. Einstein montra que si l'on abaisse suffisamment la température d'un gaz de particules jusqu'à atteindre un seuil pour lequel la distance d entre particules est égale à la longueur d'onde de de Broglie $\lambda=h/mv$ (où m la masse de la particule et v sa vitesse) associée à chaque particule, alors une transition de phase, correspondant au fait qu'un certain nombre de particules se regroupe dans le même état, se produit et forme un condensat de Bose-Einstein. Ainsi, les particules doivent dès cet instant, à l'instar des photons, ne plus suivre la statistique de Maxwell-Boltzmann mais celle que l'on appela la statistique de Bose-Einstein. Cependant, seul les particules dénommées bosons, pour lesquelles le moment cinétique intrinsèque (spin) total de la particule est un multiple pair de $h/4\pi$ peuvent former un tel état. Ceci est réalisé dès lors que la somme du nombre de protons, neutrons et électrons de l'atome est paire.

Face à la difficulté technique (atteindre la température pour laquelle $\lambda=d$) et bien que des suspicions d'existence se dégagèrent avec la découverte de la superfluidité de l'hélium liquide en 1938 (ceci diffère d'un condensat de Bose-Einstein idéal car des fortes interactions entre particules existent dans un liquide), cette prédiction d'A. Einstein n'a pu être démontrée avant 1995, date à laquelle les premiers condensats de Bose-Einstein sont formés par E.A. Cornell et C.E. Wieman d'une part et W. Ketterle d'autre part, à partir d'un gaz d'atomes de rubidium refroidi [1,2] comme le montre la figure 2. Le prix Nobel leur fut attribué pour cette découverte en 2001. Ceci ne fut possible sans l'application aux atomes de deux techniques successives : le refroidissement au moyen de lasers suivi du refroidissement par évaporation.

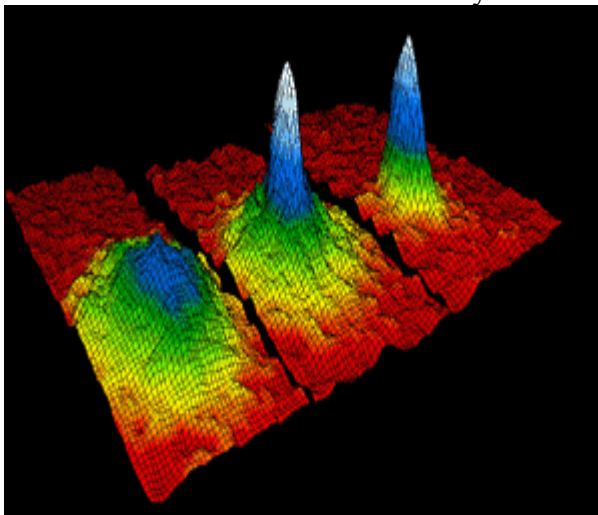


Fig. 2 : Rendu en 3D du condensat de Bose de Bose-Einstein obtenu par E.A. Cornell et C.E. Wieman. On y observe, de gauche à droite, l'évolution du nuage d'atomes vers l'état dégénéré pour des températures de plus en plus basses. Dans la dernière image de droite, pratiquement tous les atomes sont condensés. [1,2]

III. Techniques de refroidissement pour réaliser un condensat de Bose-Einstein

- a. Technique de refroidissement d'atomes par laser : réalisation d'une mélasse optique

La technique de refroidissement d'atomes au moyen de lasers, mise au point par S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W.D. Philips (qui leur a valu le prix Nobel en 1997), repose sur le principe de l'interaction entre photon et matière.

La première étape de la réalisation d'un condensat de Bose-Einstein consiste à refroidir le gaz d'atomes, c'est à dire à réduire leur vitesse d'agitation thermique, en les confinant dans un espace immatériel constitué par des lasers placés suivant les trois directions spatiales. On dit que l'on a créé une « mélasse optique ».

i. Comment crée-t'on une « mélasse optique » ?

Si l'on soumet un atome en mouvement suivant la même direction que deux faisceaux lasers de même puissance, légèrement accordée en fréquence en dessous de la fréquence de résonance d'une transition atomique de l'atome, mais se propageant en sens inverse (on dit que ces faisceaux lasers sont « contra-propageants »), alors cet atome est freiné. L'origine de ce phénomène est l'effet Doppler-Fizeau qui fait que pour l'atome se déplaçant en direction du faisceau laser venant à sa rencontre, il le verra comme ayant une fréquence augmentée et donc plus proche de sa fréquence de résonance atomique. Au contraire, il verra le faisceau laser dont le sens de propagation est le même que celui de l'atome comme ayant une fréquence plus basse que l'autre faisceau et donc plus éloignée de sa fréquence de résonance atomique. Ainsi, suivant le principe d'interaction entre photon et matière, les photons du faisceau laser venant à sa rencontre, et présentant donc une fréquence apparente plus proche de celle de résonance atomique de l'atome, seront plus facilement absorbés que ceux du faisceau laser se propageant dans le même sens que l'atome. En conséquence, la force de pression de radiation qu'exerce les photons sur l'atome est plus importante pour les photons présentant une fréquence apparente plus proche de celle de résonance atomique de l'atome. Ceci conduit à une dissymétrie des forces de pression de radiation exercées de part et d'autre de l'atome d'où un ralentissement de ce dernier quel que soit son sens de déplacement suivant l'un ou l'autre des faisceaux (car l'un ou l'autre des faisceaux aura une fréquence apparente proche de celle de résonance atomique de l'atome). Si on généralise ceci au trois dimensions de l'espace, on crée une « mélasse optique » dans laquelle l'atome est englué.

Toutefois, cette technique est limitée à cause des émissions spontanées de photons par l'atome qui s'opposent au refroidissement réalisé et donc provoquent plusieurs reculs aléatoires de l'atome. En effet, elle ne permet d'une part, d'atteindre que des températures comprises entre le mK et $10\ \mu\text{K}$, ce qui est insuffisant pour obtenir le régime de dégénérescence quantique, et d'autre part, elle ne piège pas l'atome suffisamment longtemps. Cette technique est donc relayée par celle de refroidissement par évaporation qui permet d'atteindre des températures inférieures au μK (permettant de dépasser le seuil où $\lambda=d$) mais aussi la densité atomique suffisante à la formation d'un condensat de Bose-Einstein.

b. Technique de refroidissement par évaporation

De manière simpliste, la technique du refroidissement par évaporation, mise au point en 1986 [3], consiste à piéger les atomes refroidis par lasers dans un piège de profondeur donnée puis de laisser s'échapper ceux ayant le plus d'énergie en diminuant la profondeur du piège. Bien que plusieurs méthodes (optique au moyen de lasers désaccordés, magnétique au moyen d'un champ magnétique alternatif,...) existent pour réaliser le piège, la plus efficace est de nature magnétique.

i. Piégeage magnétique

Le principe du piégeage magnétique repose sur l'utilisation d'un champ magnétique continu et exploite le moment magnétique inhérent à chaque atome qui pousse ce dernier à se conduire comme un aimant. En présence d'un champ magnétique, l'atome, de moment magnétique μ , a une énergie potentielle $-\mu B \cos\theta$ où θ est l'angle entre le moment magnétique et B le champ magnétique. En orientant le moment magnétique μ parallèlement mais de sens opposé au champ magnétique, l'énergie potentielle de l'atome est μB et donc il peut être piégé au minimum du champ magnétique.

ii. Refroidissement par évaporation

Une fois ce piège réalisé le processus de refroidissement par évaporation peut commencer. Pour diminuer la profondeur du piège, la technique la plus employée est celle proposée par l'équipe de D.E. Pritchard [4] et mise en application par celle de B. Davis [5]. Elle consiste à utiliser une onde radiofréquence dont la fréquence correspond à celle de résonance atomique des atomes piégés les plus énergétiques. Elle va provoquée un basculement du moment magnétique des ces atomes de l'état parallèle de même sens à celui de parallèle de sens opposé. Cette modification d'orientation engendre l'expulsion de ces atomes en dehors du piège. En réalisant un balayage en fréquence de l'onde radiofréquence, on abaisse progressivement la température du gaz d'atomes en expulsant les atomes les plus énergétiques jusqu'à obtenir le seuil de dégénérescence quantique. Ainsi, les atomes restant dans le piège sont donc de plus en plus froids.

IV. Condensat de Bose-Einstein sur une puce à atomes

Les avancées notables en microtechnologie ont permis, au groupe de J. Reichel, de démontrer dès 1999 [6] la validité de la technologie des puces à atomes permettant de refroidir et de piéger des atomes à proximité de leur surface au moyen des champs magnétiques créés par le courant électrique circulant dans les circuits. En 2001, le même groupe et en parallèle celui de C. Zimmermann, réalisent un condensat de Bose-Einstein d'atomes de rubidium avec ces dispositifs [7, 8], puis en 2004 conçoit une horloge atomique sur puce à atomes (non optimisée pour cette fonction) ayant une stabilité de $1,7 \cdot 10^{-11}$ à 1 s comme le montre la figure 3 [9].

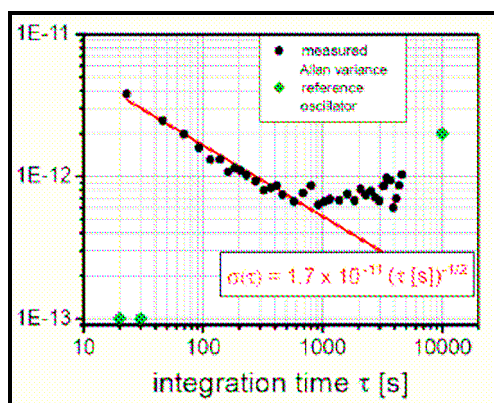


Fig. 3 : Variance d'Allan des fluctuations de fréquence relatives mesurées sur l'horloge atomique sur puce par l'équipe de J. Reichel à l'Institut Max Planck de Munich. Au delà de 600 s la stabilité est limitée par l'instabilité à long terme de l'oscillateur de référence à Quartz. [9]

Le principe du piégeage d'un nuage d'atomes sur une puce repose sur l'exploitation du champ magnétique créé par tout conducteur parcouru par un courant électrique. La valeur de ce champ magnétique est inversement proportionnelle à la distance avec le conducteur, c'est pourquoi le nuage d'atomes ne peut être que confiné à la surface de la puce plus précisément très près des conducteurs. Ainsi, la première étape pour la réalisation de la condensation de Bose-Einstein consiste à refroidir et à confiner le nuage d'atomes dans un piège magnéto-optique formé grâce à l'utilisation de lasers et du champ magnétique créé par les circuits de la puce parcourus par un courant. La technique de refroidissement est simplifiée car quatre faisceaux laser suffisent à la place des six généralement employés. En effet, une surface réfléchissante est déposée sur la puce se qui permet d'utiliser la réflexion des faisceaux laser

incidents placés dans les directions opposées et ainsi de remplacer deux faisceaux. La seconde étape est la réalisation du refroidissement évaporatif qui s'effectue plus rapidement pour une puce que pour un environnement classique à cause du fort confinement du nuage atomique.

Le LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris, Laboratoire national de métrologie désigné dans le cadre de la métrologie française pour assurer les activités du domaine du temps et des fréquences, a lancé un projet de réalisation d'une horloge à atomes piégés sur une puce (fig. 4). Ce projet (sous la responsabilité de P. Rosenbusch), réalisé en étroite collaboration avec l'équipe de J. Reichel au Laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'Ecole normale supérieure de Paris, vise ainsi à faire bénéficier la métrologie de ces gaz d'atomes dégénérés qui sont encore plus froids que les gaz d'atomes thermiques.

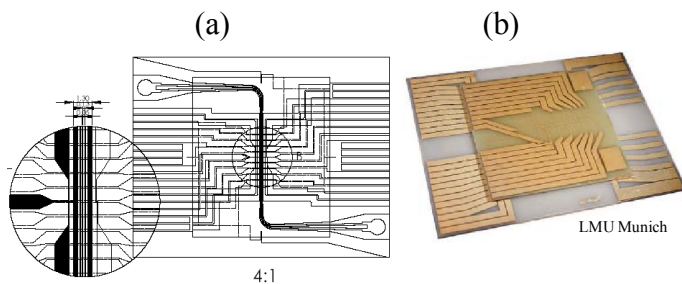


Fig. 4 : (a) Schéma de la puce dédiée à ce projet. La puce sera fabriquée en deux couches, l'une collée sur l'autre. (b) Exemple d'une puce à deux couches fabriquée à l'Université de Munich.

L'horloge micro-onde fonctionnera en alternance avec des gaz d'atomes thermiques (refroidis à des températures inférieures à la limite de recul c'est à dire à environ $0,5 \mu\text{K}$) et dégénérés se qui permettra de comparer directement les avantages et inconvénients de chacun dont notamment les effets systématiques induits qui perturbent le processus d'interrogation des atomes en déplaçant la fréquence de la transition d'horloge. Ces effets systématiques ont différentes origines qui peuvent être la température, le champ magnétique appliqué dans la zone d'interrogation pour l'effet Zeeman du second ordre, les collisions entre atomes pour le déplacement collisionnel,....

Cette horloge sur puce fonctionnera avec un gaz d'atomes de ^{87}Rb qui a fait l'objet de nombreuses études montrant ses avantages et qui par ailleurs est reconnu par le CIPM comme une représentation secondaire de la seconde. Par exemple, la transition hyperfine proche de 6,8 GHz des atomes de ^{87}Rb entre les niveaux $|F=1, m_F=-1\rangle$ et $|F=2, m_F=1\rangle$ ne présente pas de variation du déplacement de fréquence dû à la présence d'un champ magnétique statique par effet Zeeman autour d'un champ magnétique de 3,23 G comme le montre la figure 5 [10].

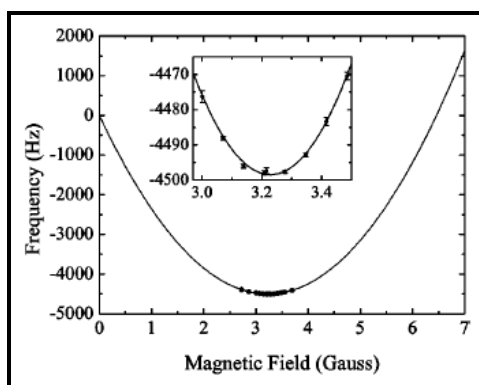


Fig. 5 : Déplacement de fréquence dû à la présence d'un champ magnétique statique par rapport à la transition hyperfine à 6,8 GHz. Les points correspondent à des mesures, la ligne est obtenue par l'équation de Breit-Rabi. [10]

Cette transition $|F=1, m_F=-1\rangle$ et $|F=2, m_F=1\rangle$ sera excitée par un photon dans le domaine micro-onde, puis par un photon dans le domaine radio-fréquence (fig. 6).

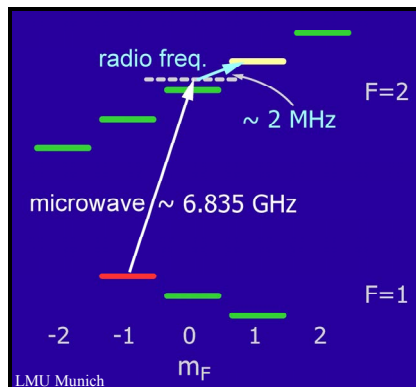


Fig. 6 : Transition d'horloge à atomes piégés du ^{87}Rb .

En outre, alors que dans un environnement classique, un gaz d'atomes dégénérés de 10^6 atomes est préparé en 30 s, et que sur une puce 10^4 à 10^5 atomes sont préparés en 3 à 8 s, le LNE-SYRTE a l'ambition de le préparer en 2 s pour un temps d'interrogation de 1 s, afin d'obtenir un rapport cyclique favorable proche de celui des fontaines atomiques.

Par ailleurs, l'étude des déplacements de fréquence de la transition d'horloge liés à la distance entre le gaz d'atomes et la surface de la puce permettra d'envisager différentes applications. Ainsi, les condensats de Bose-Einstein pourraient être employés comme détecteurs de champ magnétique combinant une haute résolution spatiale et une très grande sensibilité alors que les techniques utilisées aujourd'hui offrent soit l'une soit l'autre, mais pas les deux en même temps. En effet, des résultats récents ont montré qu'une mesure du champ magnétique avec une résolution spatiale de $3 \mu\text{m}$ et une sensibilité de 300 pT pouvait être obtenue en sondant un gaz d'atomes dégénérés formé à la surface d'une puce et placé au dessus de l'échantillon à analyser (fig. 7) [11].

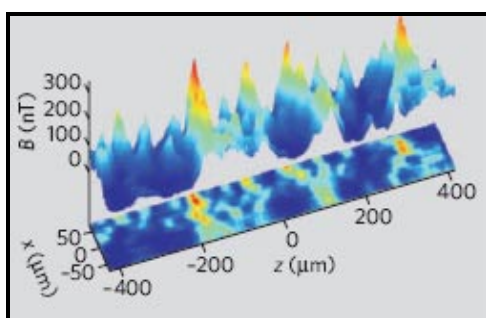


Fig. 7 : Cartographie 2D, avec une résolution de $3 \mu\text{m}$, du champ magnétique présent au moyen d'un condensat de Bose-Einstein. [11]

A l'heure actuelle, le banc optique nécessaire au refroidissement et à la manipulation des atomes a été réalisé comme le montre la figure 8. Les faisceaux lasers de refroidissement des atomes seront amenés par quatre fibres optiques. La conception et le positionnement des différentes pièces dont l'enceinte à vide contenant la puce, les blindages magnétiques et les éléments optiques ont été réalisés au moyen de la CAO (fig. 9).



Fig. 8 : Banc optique.

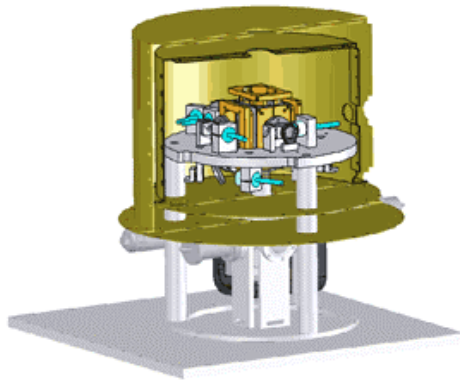


Fig. 9 : Conception par CAO des blindages magnétiques , de l'enceinte à vide (au centre),....

Ce projet permettra peut être d'ouvrir la voie à la réalisation d'horloges présentant des dimensions très réduites avec de hautes stabilité et exactitude, mais permettra peut être aussi à d'autres dispositifs métrologiques de voir le jour comme par exemple des capteurs inertiels de très hautes performances.

Références :

- [1] M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman, and E.A. Cornell, *Science*, **269**, 198 (1995).
- [2] J. Faller, *A Century of Excellence in Measurements, Standards, and Technology*, NIST Special Publication **958**, 375 (2000).
- [3] H. F. Hess, *Phys. Rev. B*, **34**, 3476 (1986).
- [4] D. E. Pritchard, K. Helmerson and A. G. Martin, *at. phys.*, **11**, 179 (1989).
- [5] K.B. Davis, M.O. Mewes, M.A. Joffe, M.R. Andrews and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 5202 (1995).
- [6] J. Reichel, W. Hänsel and T.W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 3398 (1999).
- [7] W. Hänsel, P. Hommelhoff, T.W. Hänsch and J. Reichel, *Nature*, **413**, 498 (2001).
- [8] H. Ott, J. Fortágh, G. Schlotterbeck, A. Grossmann and C. Zimmermann, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 230401 (2001).
- [9] Ph. Treutlein, P. Hommelhoff, T. Steinmetz, T.W. Hänsch, and J. Reichel, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 203005 (2004).

[10] D. M. Harber, H. J. Lewandowski, J. M. McGuirk, and E.A. Cornell, *Phys. Rev. A*, **66**, 053616 (2002).

[11] S. Wildermuth, S. Hofferberth, I. Lesanovsky, E. Haller, L. M. Andersson, S. Groth, I. Bar-Joseph, P. Krüger and J. Schmiedmayer, *Nature*, **435**, 440 (2005).

Quelques articles de vulgarisation et liens

- A. Aspect et J. Dalibard, « Le refroidissement des atomes par laser », *La recherche*, n°261, vol. 25, 30 (janvier 1994).
- J. Reichel, « Les puces à atomes », *Pour la science*, n°330, 62 (avril 2005).
- Conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 22 juin 2005 par J. Dalibard « Les condensats de Bose-Einstein ».
- D. Guéry-Odelin et J. Dalibard, « Atomes froids et condensats quantiques », *Pour la science*, dossier n°53, 28, (octobre-décembre 2006).
- <http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl>

Equipe du projet horloge à atomes piégés sur puce :

- LNE-SYRTE/ Observatoire de Paris : P. Rosenbusch, C. Lacroûte.
- LKB/ Ecole normale supérieure de Paris : J. Reichel, F. Reinhard, A. Sinatra, Li Yun.

S. Gille
Direction de la Recherche Scientifique et Technologique
Laboratoire national de métrologie et d'essais
Tél. +33 (0)1 40 43 40 58