

DOSSIER : AMP2005

Mesure absolue de l'attraction terrestre par interférométrie atomique et application à la définition d'une nouvelle unité de masse

Patrick Cheinet

LNE-SYRTE Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

patrick.cheinet@obspm.fr

Résumé : *Le kilogramme étalon est le dernier artefact du système international d'unités et il a été observé que sa masse dérive au cours du temps. L'expérience dite de balance du Watt est une des pistes envisagées pour changer la définition de la masse en la reliant à une constante fondamentale : la constante de Planck h . Dans cette expérience, une connaissance très précise de l'attraction terrestre g est nécessaire. C'est pourquoi le LNE-SYRTE a décidé de construire un gravimètre absolu basé sur l'interférométrie atomique et utilisant des atomes froids.*

Introduction

Le kilogramme, unité de masse du système international (S.I.), est défini comme la masse d'un cylindre en alliage de platine et d'iridium appelé prototype international et conservé au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Plusieurs copies ont été fabriquées et comparées régulièrement avec le prototype international [1]. L'exactitude de ces pesées a alors permis la mise en évidence d'une dérive des masses allant jusqu'à 10^{-7} de variation relative sur le siècle dernier ($\sim 100 \mu\text{g}$). Or rien ne permet de distinguer si c'est la masse du prototype international qui varie ou bien celle de ses copies. Cet inconvénient vient de l'utilisation d'un objet matériel unique et altérable comme définition de la masse et il est maintenant envisagé de changer cette définition.

Pour cela, plusieurs moyens sont explorés et notamment de relier le kilogramme à la constante de Planck h , qui est une constante fondamentale qui intervient dans de nombreux domaines de la physique quantique. Le lien sera effectué à l'aide d'une balance électromagnétique appelée balance du Watt [2], qui comparera une puissance générée

électriquement avec une puissance mécanique. Sa mise en œuvre suppose de mesurer simultanément un grand nombre de grandeurs physiques. L'objectif à atteindre afin de changer de définition est une incertitude relative de 10^{-8} sur le kilogramme et il faut pour cela que chaque grandeur physique soit mesurée avec une incertitude encore plus faible. Notamment l'accélération terrestre g , qui intervient dans la puissance mécanique, doit donc être mesurée avec une exactitude de 10^{-9} .

Afin de mesurer g , le LNE-SYRTE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essai-Systèmes de Références Temps Espace) a opté pour la réalisation d'un gravimètre absolu, interféromètre à atomes froids. Cette technique permet de mesurer à l'aide de trois impulsions laser, la position en trois instants d'atomes froids en chute libre. On extrait ensuite l'accélération moyenne subie entre les impulsions.

Nous verrons dans la première partie comment est réalisée la pesée afin de ne comporter que des grandeurs physiques mesurables avec une précision suffisante.

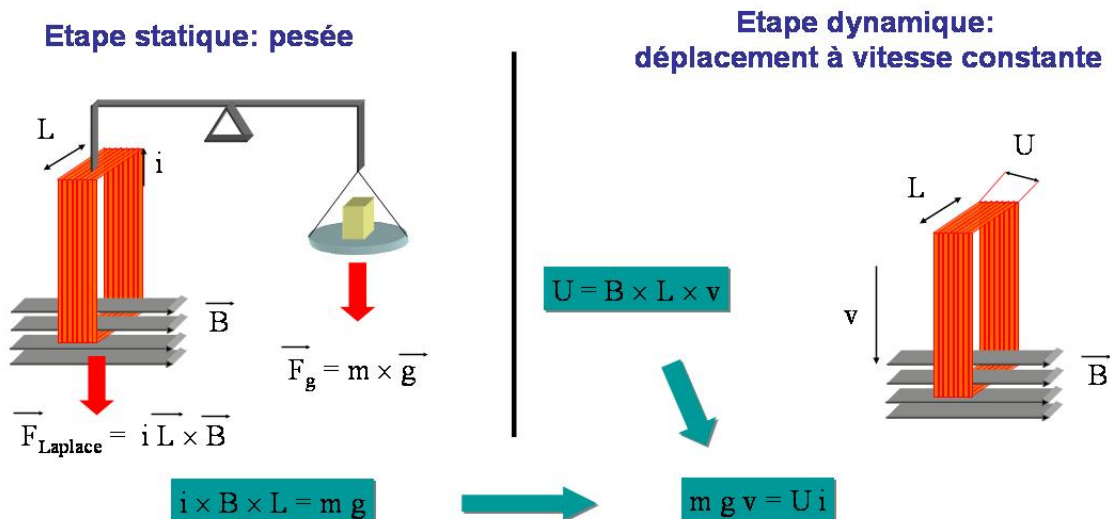


Figure 1 : *principe de mesure de la balance du Watt. Dans une première étape, une pesée équilibre le poids exercé par la pesanteur et la force de Laplace exercée sur une bobine parcourue par un courant en présence d'un champ magnétique. Dans une deuxième étape, la bobine est déplacée à vitesse constante dans le champ magnétique et on mesure la tension qui apparaît à ses bornes. La combinaison des deux étapes permet d'obtenir l'équation clé de la balance du Watt*

La deuxième partie présente les différentes mesures nécessaires pour calibrer la balance. Nous verrons alors que cette calibration fournit un lien entre le prototype international et la constante de Planck. Nous nous concentrerons ensuite sur la mesure de l'attraction terrestre. Dans la troisième partie, nous verrons comment refroidir et piéger des atomes. Enfin dans la quatrième et dernière partie, nous développerons le principe de la mesure de g par interférométrie.

La balance du watt : la mesure

Commençons donc par préciser le principe de la balance du watt. La mesure se déroule en deux étapes. La première (étape statique) met en oeuvre une masse connue m . Cette masse n'est pas le prototype international car son alliage de platine et d'iridium ne présente pas toutes les propriétés physiques nécessaires à la réalisation de l'expérience (amagnétisme, dureté, stabilité de masse lors de la mise sous vide...). Des alliages à base d'or et de platine sont donc actuellement étudiés pour réaliser cette masse m qui sera étalonnée par comparaison avec le prototype international. On réalise alors une pesée à l'aide d'une balance à fléau en équilibrant la force $m \cdot g$ exercée sur la masse par l'attraction terrestre d'un côté, par une force électromagnétique de l'autre

côté (figure 1, gauche). La force électromagnétique employée est la force de Laplace exercée sur une bobine carrée de côté L , dont un côté est plongé dans un champ magnétique uniforme B , et parcourue par un courant i . A l'équilibre, on obtient alors l'équation 1.

$$iBL = mg \quad (\text{Eq. 1})$$

Cette équation requiert la connaissance du produit BL que les moyens actuels ne permettent pas de mesurer avec une exactitude suffisante. Une seconde étape dite dynamique (figure 1, droite) est alors réalisée, où la même bobine est déplacée verticalement à vitesse constante v dans le champ magnétique. La variation du flux magnétique traversant la bobine génère à ses bornes, selon la loi de Lenz, une force électromotrice induite U (équation 2).

$$U = BLv \quad (\text{Eq. 2})$$

On peut alors combiner les équations 1 et 2 pour éliminer les termes B et L et on obtient ainsi l'équation 3 dans laquelle le premier terme correspond à une puissance électrique tandis que le second correspond à une puissance mécanique.

$$mgv = Ui \text{ (Eq. 3)}$$

En pratique, le courant i est mesuré indirectement à partir de la chute de tension V qu'il provoque aux bornes d'une résistance de référence R , ce qui amène enfin à l'équation 4.

$$mgv = \frac{UV}{R} \text{ (Eq. 4)}$$

La balance du watt : les références électriques

Nous disposons maintenant d'une mesure de la masse par rapport à deux grandeurs électriques qui présentent l'avantage d'être mesurables avec une grande précision. Voyons maintenant comment on réalise leur mesure. Deux phénomènes quantiques macroscopiques, l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, sont utilisés pour mesurer les tensions et la résistance. Chacun permet d'exprimer ces valeurs en fonction de deux constantes fondamentales : la charge de l'électron e et la constante de Planck h .

L'effet Josephson [3,4] apparaît sur des structures constituées de deux matériaux supraconducteurs séparés par une fine barrière isolante (figure 2). Un tel système est appelé jonction Josephson. A basse température, le courant dans un supraconducteur est porté par des électrons associés par paires, dites paires de Cooper, ayant toutes le même état quantique décrit par une seule fonction d'onde macroscopique. Cela revient à dire qu'elles présentent toutes exactement les mêmes caractéristiques physiques.

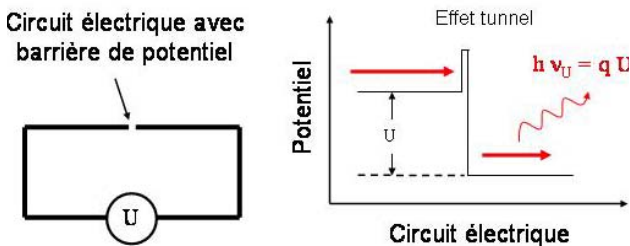


Figure 2 : Effet Josephson. En traversant la barrière de potentiel, une paire d'électrons émet un photon. La fréquence du photon dépend de la tension U appliquée.

Lorsque la barrière isolante, séparant les deux supraconducteurs, est suffisamment fine, les paires

de Cooper peuvent alors la traverser par effet tunnel et un courant peut s'établir. Si une tension continue U est appliquée à la jonction, un courant alternatif de fréquence ν_U apparaît.

En termes quantiques, la génération d'un courant alternatif correspond à l'émission de photons : Les paires de Cooper ayant traversé la jonction ont alors un excédent d'énergie correspondant à l'énergie potentielle $E=qU$. Elles libèrent cet excédent d'énergie sous la forme d'un photon. En physique quantique, l'énergie d'un photon est déduite de sa fréquence ν_U par le biais de la constante de Planck : $E_{ph}=h\nu_U$. On déduit donc l'équation 5.

$$E_{ph} = h\nu_U = qU \text{ (Eq. 5)}$$

Où q est la charge d'une paire de Cooper ($q=2e$). La mesure de la fréquence de ces photons renseigne donc sur la tension appliquée qui est donc donnée par l'équation 6 :

$$U = \frac{h\nu_U}{2e} \text{ (Eq. 6)}$$

En pratique, la mesure de la fréquence n'est pas aisée et l'effet inverse est utilisé pour matérialiser des tensions de référence. Un signal micro-onde de fréquence connue, délivré par une horloge atomique, est appliqué à la jonction qui génère alors à ses bornes la tension continue dont la valeur est définie par l'équation 6. Par convention internationale, la valeur du rapport fréquence tension, proportionnel à $2e/h$, a été fixée à 483594 GHz/V en 1990. Les niveaux d'incertitude atteints lors de la mise en œuvre de références de tension à effet Josephson sont couramment de l'ordre de 10^{-10} en valeur relative.

De façon similaire, l'effet Hall quantique [5,6] est utilisé comme référence pour la mesure des résistances. Ce phénomène est une propriété des gaz d'électrons bidimensionnels (confinés dans un plan) soumis à un champ magnétique perpendiculaire à leur plan. Un tel gaz est obtenu dans une fine couche de matériau semi-conducteur refroidie en dessous d'une température critique, qui vaut typiquement 1,5 K. Lorsque le gaz d'électrons est parcouru par un courant i et est soumis à un fort champ magnétique B' perpendiculaire, il voit une tension U_H se développer perpendiculairement au sens d'écoulement du courant électrique, à cause de la force de Laplace exercée par le champ magnétique sur les électrons en mouvement. La

figure 3 représente la mesure de la résistance de Hall quantique, définie par l'équation 7, aux bornes d'un échantillon :

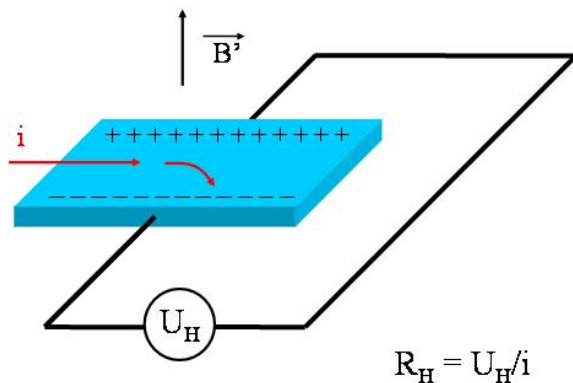


Figure 3 : Effet Hall quantique. Un ruban conducteur sous un champ magnétique B' , et parcouru par un courant i , développe une tension U_H perpendiculairement au champ et au courant. En dessous d'une température critique, la quantification des électrons impose à la résistance de Hall R_H des valeurs discrètes.

Dans un conducteur en volume, la résistance de Hall est proportionnelle au champ magnétique B' . Dans le cas du gaz bidimensionnel, elle prend des valeurs discrètes. Les électrons ne peuvent plus avoir que des énergies discrètes que l'on appelle niveaux d'énergie de Landau. La résistance de Hall R_H présente alors des plateaux dont les valeurs constantes ne peuvent prendre que les valeurs $h/(ne^2)$ où n est un entier dépendant du champ magnétique.

$$R_H = \frac{U_H}{i} = \frac{h}{ne^2} \text{ (Eq. 7)}$$

Comme pour l'effet Josephson, la valeur du rapport tension/courant proportionnel à h/e^2 a été fixée par convention à 25812,807 Ω en 1990. Les niveaux d'incertitude atteints lors de la mise en œuvre de l'effet Hall quantique comme référence de résistance sont couramment de l'ordre de 1.10^{-9} en valeur relative.

On utilise les deux effets que nous venons de décrire pour mesurer la résistance et les tensions présentes dans l'équation 4. Cela conduit alors à exprimer la puissance électrique (équation 8) sous la forme du produit de la constante de Planck, de deux fréquences Josephson (mesures de U et de V)

et d'un terme de proportionnalité A relatif à la comparaison de R à R_H .

$$\frac{UV}{R} = h \nu_U \nu_V A \text{ (Eq. 8)}$$

La vitesse ν de la bobine est quant à elle asservie à une valeur connue, par interférométrie optique. Un des miroirs d'un interféromètre est fixé sur la bobine. On peut alors mesurer son déplacement et l'asservir avec une précision de l'ordre d'une fraction de la longueur d'onde du laser utilisé ($\lambda \sim 5.10^{-7}$ m). Il reste à mesurer l'accélération de la pesanteur avec l'incertitude requise pour pouvoir écrire l'équation 9.

$$\frac{h}{m} = \frac{g\nu}{A \nu_U \nu_V} \text{ (Eq. 9)}$$

Cette relation montre comment déterminer, dans le cadre actuel du S.I., une valeur de la constante de Planck. Cette mesure, répétée dans le temps, permettrait de déterminer d'éventuelles variations de masse du prototype international du kilogramme.

Enfin, un consensus international similaire à celui qui a conduit à changer la définition du mètre en adoptant une valeur conventionnelle de la vitesse de la lumière, pourrait conduire à une nouvelle définition du kilogramme à partir de la valeur de la constante de Planck. Cette définition garantirait l'invariance de l'unité de masse et donnerait la possibilité de la matérialiser en tout lieu, puisqu'elle serait alors indépendante du prototype international.

Gravimètre absolu : refroidissement d'atomes

Nous avons maintenant obtenu une équation permettant de définir l'unité de masse à partir de la constante de Planck. Cependant l'attraction terrestre g est une grandeur qui dépend de l'emplacement de la mesure et du temps. Il faut donc la mesurer en même temps que l'on réalise la pesée. L'objectif est de mesurer l'attraction terrestre g avec une exactitude de 10^{-9} g. Or la seule méthode connue pour mesurer g de manière absolue est de mesurer l'accélération d'un objet en chute libre, par rapport au référentiel du laboratoire [7,8].

L'utilisation d'un nuage d'atomes froids, plutôt qu'un objet macroscopique, permet de réaliser l'expérience à une fréquence plus élevée (4

Hz contre ~ 0.1 Hz) afin d'acquies plus de données et donc de moyenniser plus vite le bruit de la mesure. Nous allons voir maintenant comment fonctionne notre gravimètre atomique et tout d'abord comment refroidir des atomes en utilisant les propriétés de l'effet Doppler. Cette étape est nécessaire afin de contrôler la vitesse et la trajectoire des atomes qui ont, à température ambiante, une vitesse caractéristique de 300 m.s^{-1} ($\sim 1000 \text{ km/h}$). Considérons une onde, sonore ou électromagnétique, émise par une source en mouvement par rapport à un observateur.

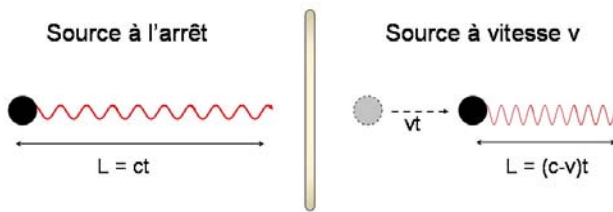


Figure 4 : Effet Doppler. La fréquence d'une onde est modifiée si la source est en mouvement. L'énergie qui lui est associée est elle aussi modifiée.

Comme on le voit sur la figure 4, ce mouvement affecte la fréquence apparente de l'onde puisque le nombre d'oscillations observées pour une durée donnée est modifié par le déplacement de la source. Cela change aussi l'énergie : si la source se rapproche, l'énergie reçue est plus élevée que si la source était immobile. De même si la source s'éloigne, l'énergie reçue est plus faible. Ce phénomène est appelé effet Doppler. Il explique par exemple que la sirène d'une ambulance paraisse plus aiguë lorsqu'elle se rapproche et plus grave lorsqu'elle s'éloigne.

De plus, comme on peut le voir sur la figure 5, un atome qui absorbe un photon est dans le même temps poussé dans le sens de propagation du photon absorbé selon le principe de conservation de la

quantité de mouvement. On dit qu'il acquies la quantité de mouvement p du photon donnée par l'équation 10. Celle-ci est faible, résultant en un changement de vitesse de quelques millimètres par seconde.

$$p = \hbar k \text{ (Eq. 10)}$$

Mais l'atome peut absorber un grand nombre de photons en un temps très court, jusqu'à des millions par seconde. Cela permet alors de transmettre à un atome une accélération considérable, de l'ordre de $10^5 g$. On peut donc aisément arrêter un atome de vitesse élevée et le soutenir contre la gravité terrestre.

Enfin les atomes possèdent des niveaux d'énergie définis auxquels ils peuvent accéder. On voit sur la partie droite de la figure 5 qu'un atome peut absorber un photon à la condition que ce photon apporte une énergie suffisamment proche de la différence d'énergie ΔE entre ses niveaux d'énergie. On appelle cet écart l'énergie de transition.

Il est maintenant possible de combiner ces différentes propriétés afin d'obtenir un mécanisme de refroidissement. On utilise un laser dont l'énergie des photons est légèrement inférieure à l'énergie de transition. On voit alors sur la figure 6 au centre que si un atome éclairé par ce laser est à l'arrêt, la probabilité qu'il absorbe un photon est alors faible et le laser n'exerce presque pas de force sur l'atome. L'énergie du laser est symbolisée par les flèches vertes et l'énergie apparente vue par l'atome est symbolisée par les flèches rouges. Si l'atome s'éloigne du laser (à gauche), l'énergie apparente des photons sera, par effet Doppler, encore plus faible et la probabilité d'absorption devient négligeable.

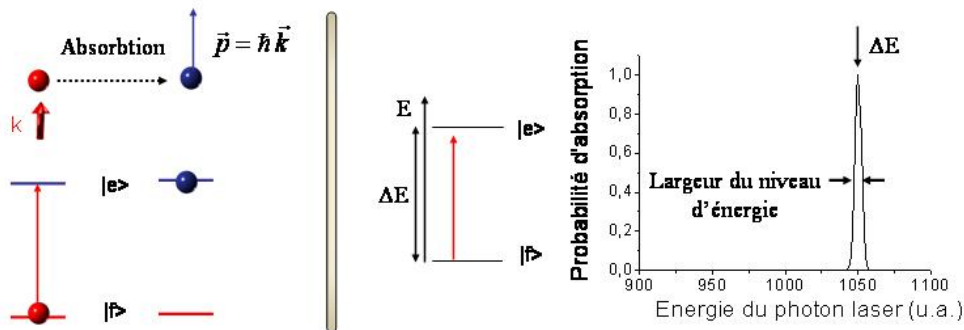


Figure 5 : Absorption d'un photon. Un atome absorbant un photon est poussé dans la direction incidente du photon. Il ne peut absorber un photon que si son énergie correspond à l'écart d'énergie entre les « niveaux énergétiques » de l'atome.

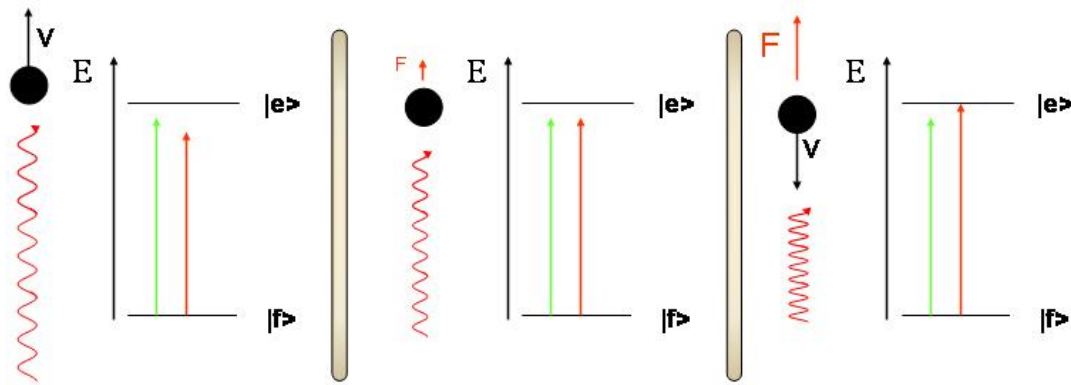


Figure 6 : Refroidissement Doppler. L'énergie du laser au repos (vert) est inférieure à l'énergie de transition. Un atome s'éloignant n'est pas affecté par le laser tandis qu'un atome s'approchant est freiné efficacement.

Par contre si l'atome a une vitesse en direction du laser (à droite), l'énergie apparente est alors plus proche de l'énergie de transition et la probabilité d'absorption devient importante. Le laser va exercer une force de freinage sur l'atome.

En éclairant un volume de tous côtés, dans les trois dimensions, tout atome entrant dans cette zone est freiné puisqu'il subit une pression de radiation qui est automatiquement opposée à son déplacement quelle que soit sa vitesse initiale. L'atome est comme freiné par un liquide visqueux et on a appelé ce système une mélasse optique. Cela va donc réduire l'agitation thermique d'une vapeur de cet atome et on obtient un nuage d'atomes refroidis.

Afin de disposer d'un très grand nombre d'atomes, il faut rajouter une force de piégeage. On peut montrer qu'il est possible de rajouter un champ magnétique variant dans l'espace et de choisir la polarisation des lasers pour créer une force de rappel. Un atome, par exemple trop à droite, absorbera plus de photons venant de la droite et sera repoussé vers le centre, où le champ magnétique est nul. On accumulera alors les atomes dans ce qu'on appelle un piège magnéto-optique. La configuration que l'on obtient alors est représentée sur la figure 7. Pour créer le champ magnétique du piège, on utilise deux bobines circulaires parcourues par des courants égaux mais dans des sens opposés. On obtient un piège avec des polarisations circulaires des faisceaux lasers (σ^+ ou σ^-). Cette technique est décrite avec plus de détails dans [9].

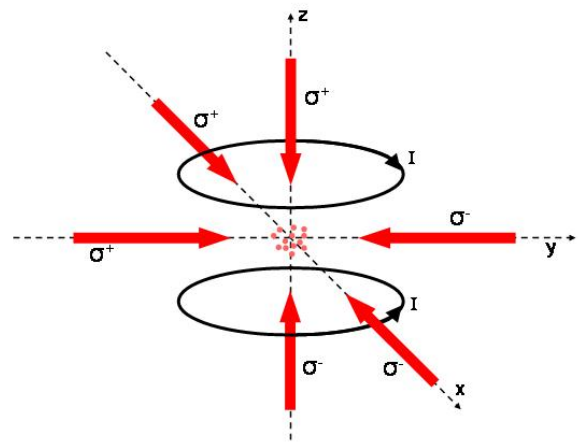


Figure 7 : Piège magnéto-optique à 3 dimensions. Une paire de bobines, associée à six faisceaux lasers convenablement polarisés, réalise le piège.

On peut ainsi capturer et refroidir à quelques μK , jusqu'à un milliard d'atomes en quelques centaines de millisecondes. Ceci correspond à une vitesse d'agitation thermique de 1 cm par seconde environ au lieu de 300 m par seconde.

Gravimètre absolu : l'interféromètre

Nous avons maintenant une source d'atomes refroidis. Leur vitesse est faible et ils peuvent être libérés tout en contrôlant leur trajectoire. Le piège est donc éteint et les atomes tombent en chute libre sous l'effet de la gravité. On va alors réaliser l'interféromètre atomique qui est schématisé sur la figure 8. Trois impulsions lasers sont appliquées aux atomes, pendant leur chute, à intervalles réguliers T .

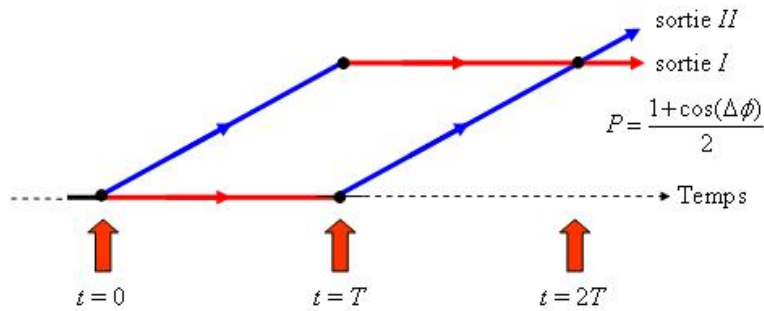


Figure 8 : *Interféromètre atomique. Une suite de trois interactions avec des lasers sépare, puis recombine les fonctions d'ondes atomiques. Le nombre d'atomes dans les deux niveaux, fondamental et excité, à la sortie de l'interféromètre, dépend de l'accélération terrestre.*

La première impulsion laser est telle que l'atome a une probabilité de 50 % de changer de niveau d'énergie. L'absorption d'un photon transfère alors une différence de vitesse qui induit une séparation spatiale des atomes en deux bras de l'interféromètre. Après un temps T , la deuxième impulsion est telle que tous les atomes changent d'énergie, soit en revenant au niveau d'énergie initial pour les atomes ayant déjà effectué la transition, soit en effectuant la transition pour la première fois. Cela va en même temps intervertir les vitesses dans les deux bras. Après un second temps T , les deux bras se seront donc rejoints et une troisième et dernière impulsion ferme l'interféromètre. Les atomes pourront soit émettre un photon pour revenir dans le niveau d'énergie initial (sortie I), soit absorber un photon et finir dans le niveau de haute énergie (sortie II). D'après la mécanique quantique, chaque atome sera passé partiellement par les deux bras à la fois ! Les propriétés physiques peuvent évoluer différemment sur chaque bras, entraînant une différence de phase de l'onde atomique entre chaque bras. L'état de sortie dépend de cette différence de phase au moment de la fermeture de l'interféromètre. Autrement dit, le nombre respectif d'atomes dans les deux sorties dépend de ce qu'on appelle la phase interférométrique Φ et les probabilités sont données par l'équation 11.

$$P = \frac{1 \pm \cos(\Phi)}{2} \text{ (Eq. 11)}$$

Enfin la phase interférométrique est liée à l'accélération terrestre g : à chaque impulsion, les atomes changeant de niveau vont aussi acquérir ou perdre la phase φ de l'onde laser. Or cette phase dépend de l'instant de l'impulsion mais aussi de la

position z des atomes à cet instant, selon l'équation 12, où w est la fréquence du laser, t l'instant de l'impulsion et k le vecteur d'onde du laser.

$$\varphi = (wt + kz) \text{ (Eq. 12)}$$

Les atomes étant en chute libre, leur position au cours du temps est donnée par la loi de Newton (Eq. 13). On peut alors montrer que la phase interférométrique est donnée en fonction de g par l'équation 14, où on rappelle que T est le temps écoulé entre chaque impulsion laser de l'interféromètre.

$$z = \frac{gt^2}{2} \text{ (Eq. 13)}$$

$$\Phi = kgT^2 \text{ (Eq. 14)}$$

Ainsi mesurer la probabilité de transition à travers l'interféromètre permet de connaître la phase Φ (Eq. 11) et donc l'accélération terrestre g (Eq. 14). La sensibilité du gravimètre dépendra du rapport entre le déphasage total Φ et le plus petit déphasage observable $\delta\Phi$. Dans d'autres expériences de physique atomique, il a déjà été montré qu'il est possible de mesurer des déphasages de 1 mrad. Pour atteindre une sensibilité de $10^{-9} g$, il faut alors avoir 10^6 rad de déphasage interférométrique. Cela est facilement réalisable avec un temps total dans l'interféromètre de $2T = 100$ ms et une chute libre d'à peine 10 cm.

Conclusion

Nous avons donc vu que l'unité de masse a besoin d'être redéfinie et que la Balance du Watt est une des méthodes envisagées. Dans le cadre de ce projet, une mesure absolue de l'accélération

terrestre g est nécessaire. Un gravimètre utilisant des atomes refroidis a été construit et permettra de mesurer g avec une sensibilité et une exactitude de $10^{-9} g$. Notre gravimètre présente déjà une sensibilité de $5.10^{-9} g$ après 100 secondes de mesure.

Remerciements

Je tiens à remercier l'équipe du LNE-SYRTE ainsi que M. Genevès du LNE-CME, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée dans la rédaction de cet article.

Références :

- [1] G. Girard, "The third periodic verification of national prototypes of the kilogram", *Metrologia*, **31**, p 317, (1994)
- [2] B.P. Kibble, I.A. Robinson, J.H. Belliss, "A realization of the SI Watt by the NPL Moving-coil balance", *Metrologia*, **27**, p 173, (1990)
- [3] B.D. Josephson, *Phys. Lett.*, **1**, p 251 (1962)
- [4]http://www.lne.fr/fr/r_et_d/metrologie_electrique/metrologie_electrique_quantique_EJ.shtml
- [5] K. von Klitzing et al, *Phys. Rev. Lett.*, **45**, p 494 (1980).
- [6] http://www.lne.fr/fr/r_et_d/metrologie_electrique/metrologie_electrique_quantique_EHQ.shtml
- [7] I. Marson, J. E. Faller, *J. Phys. E : Sci. Instrum.* **19**, p 22 (1986).
- [8] A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu, *Nature* **400**, p 849 (1999).
- [9] A. Aspect, J. Dalibard, *La Recherche*, **25**, n°261, p 30, (1994)