

⑲ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
—
PARIS
—

⑪ N° de publication : **2 826 446**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

⑳ N° d'enregistrement national : **01 08112**

⑤① Int Cl⁷ : G 01 C 19/58, G 01 P 15/00, 9/00

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ CAPTEUR INERTIEL A ATOMES LENTS.

②② Date de dépôt : 20.06.01.

③① Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 27.12.02 Bulletin 02/52.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 19.09.03 Bulletin 03/38.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥① Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦① Demandeur(s) : *SAGEM SA Société anonyme* — FR.

⑦② Inventeur(s) : AUDREN JEAN THIERRY, BORDE
CHRISTIAN, BOUYER PHILIPPE, CLAIRON ANDRE,
DIMARCQ NOEL, FEATONBY PAUL DAVID, FILS
JEROME, HOLLEVILLE ARNAUD, LANDRAGIN
ARNAUD, PETIT PIERRE et SALOMON
CHRISTOPHE.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : CABINET PLASSERAUD.

FR 2 826 446 - B1



CAPTEUR INERTIEL A ATOMES LENTS

La présente invention concerne de façon générale les capteurs inertiels (gravimètres, accéléromètres et surtout gyromètres) à ondes de matière utilisant l'interférométrie et mettant en œuvre des transitions Raman pour réaliser une séparation de faisceaux de matière (atomes en général). Elle présente une application particulièrement importante, bien que non exclusive, constituée par les gyromètres à très haute sensibilité.

Le document US-A-5 274 232 propose déjà un procédé et un dispositif utilisables pour la gravimétrie, utilisant la superposition d'au moins deux ondes électromagnétiques à des fréquences différentes pour produire une énergie électromagnétique à une troisième provoquant des transitions internes des atomes accompagnées d'un transfert de quantité de mouvement permettant la séparation des paquets d'ondes atomiques.

L'article "Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope", de Gustavson et autres, Class. Quantum grav. 17(2000),2385, auquel on pourra se reporter, décrit un gyroscope comportant une source continue d'un jet d'atomes "chauds" (à une vitesse de l'ordre de 290 m/s) vers trois zones où s'effectuent des interactions successives et comportant trois couples constitués chacun de deux lasers. Le premier couple fournit deux faisceaux de lumière de sens opposés dont la différence de fréquence est égale à la séparation hyperfine pour les atomes dans leur état fondamental. La transition Raman provoque une séparation du jet répartissant les paquets d'ondes atomiques sur deux trajectoires. Le second couple joue le rôle de miroir provoquant un échange des états atomiques et des énergies et ramène les trajectoires l'une vers l'autre et le troisième couple agit pour recombinaison des trajectoires de façon à constituer un interféromètre de type Mach-Zehnder.

La rotation de l'interféromètre provoque un déphasage entre les deux trajectoires et le signal d'interférence est observé par mesure du nombre d'atomes dans un état interne particulier, par exemple à l'aide d'un laser accordé

à la résonance et provoquant la formation d'une image de fluorescence atomique sur une photodiode.

Une représentation schématique d'un gyromètre à ondes de matière de ce type, tel qu'il est réalisé à l'heure actuelle, est donnée sur la figure 1. Le gyromètre comprend une source d'atomes 10 capable de générer un jet permanent d'atomes "chauds" et de le projeter dans une direction déterminée 12. Le jet est par exemple horizontal et le gyromètre est prévu pour mesurer les rotations Ω autour d'un axe vertical. Souvent on utilise un jet d'atomes de césium ou de rubidium.

Les atomes provenant de la source 10 sont soumis à trois interactions successives. Ils traversent d'abord une première zone d'interaction 14 dans laquelle ils sont soumis à une impulsion Raman, dite $\pi/2$, pouvant être créée par une paire de faisceaux laser dont la différence de fréquence correspond à la séparation hyperfine des états fondamentaux ($F = 3$ et 4) du césium. Dans une seconde zone d'interaction 16, l'impulsion laser, dite π , provenant d'un second couple de lasers opposés, agissant sur les deux faisceaux qui contiennent des atomes dans deux états atomiques différents, joue le rôle de miroirs et provoque un échange d'états atomiques. Enfin, dans une troisième zone d'interaction 18, un troisième couple de lasers fournit une impulsion, dite $\pi/2$, qui recombine les trajectoires et forme un interféromètre permettant de mesurer la différence de phases entre les deux trajets atomiques. La différence de phases se traduit par des franges d'interférence atomique, détectées par un capteur 20. Toute rotation Ω autour d'un axe sensible 22 provoque une différence de phases entre les deux trajectoires, qui forment les bras d'un interféromètre, et change la position des franges. On peut ainsi mesurer des angles aussi faibles que 1 nrad sur 1 seconde, l'effet Sagnac étant plus d'un milliard de fois plus élevé que dans le cas d'un gyromètre optique pour des interféromètres d'aires équivalentes.

Ce gyromètre est continu, les atomes étant émis en permanence. Le temps mis par les atomes pour passer d'une interaction à la suivante est en général d'environ 7 ms.

La rotation mesurée est celle qui est intervenue entre la première impulsion, dans la zone 14, et la troisième, dans la zone 18.

Un tel gyromètre présente des inconvénients. Il est très long car les atomes sont rapides. La vitesse des atomes n'est pas très bien contrôlée. Or elle détermine le facteur d'échelle. Les trois zones sont très écartées (environ 1m) et la stabilisation relative des phases, des directions et des positions des faisceaux est en conséquence difficile. Le gyromètre ne peut pas travailler en mode dit "temporel" où les faisceaux sont pulsés dans le temps, à des instants fixés par un circuit de synchronisation.

On connaît par ailleurs des appareils utilisant des impulsions séparées dans le domaine temporel. Les appareils existants de ce type ont l'inconvénient de ne pas fournir une mesure continue, mais par séquences successives correspondant chacune à l'émission d'une bouffée d'atomes par la source et à l'émission successive de trois impulsions Raman. La durée d'une séquence, qui dépend de la vitesse donnée aux atomes et de la distance entre les zones d'interaction, est de l'ordre de 100 ms et la période de répétition des séquences est de l'ordre de 1 seconde. Les rotations ne sont donc mesurées que sur de courtes périodes de temps, séparées par des intervalles ayant une durée supérieure d'un ordre de grandeur. Si en effet on cherche à rapprocher temporellement les séquences, il existe un risque d'interaction de la lumière des atomes d'une bouffée avec les atomes de la bouffée précédente et /ou suivante. Or bien souvent, il est nécessaire ou souhaitable d'avoir une mesure continue ou quasi continue.

La présente invention vise notamment à fournir un appareil de mesure de grandeur inertielle mettant en œuvre une interférométrie atomique, comprenant :

- au moins une source d'émission d'atomes lents suivant une trajectoire balistique dans un espace sous vide,

- des moyens d'émission de faisceau laser vers la dite trajectoire pour provoquer des interactions successives avec les atomes lents provoquant des transitions Raman, les interactions provoquant successivement:

- une séparation spatiale des paquets d'ondes atomiques suivant deux trajets divergents,

- au moins un effet miroir ramenant les trajets l'un vers l'autre,

- une recombinaison des atomes provenant des deux trajets, et

5 - des moyens de détection sensibles à l'état interne des atomes,

caractérisé en ce que les moyens d'émission de faisceau laser sont synchronisés de façon qu'un paquet d'atomes lents subissent la première interaction alors que la dernière interaction sur des atomes provenant de la même source et/ou d'une source fournissant des atomes sur une trajectoire en coïncidence mais de sens opposé, est en cours sur un paquet précédent.

10

Le terme "atomes" est utilisé ci-dessus pour des raisons de commodité mais en principe un appareil du type décrit ci-dessus, et notamment un gyromètre, est utilisable avec n'importe quel atome, molécule, ou particule élémentaire ionisée ou non.

15

Les termes "paquet d'atomes lents" ou "bouffée d'atomes lents" désignent une bouffée d'atomes ayant une vitesse moyenne inférieure à 20 m/sec en vol balistique. Une telle vitesse permet de réaliser un appareil et notamment un gyromètre compact. On utilisera avantageusement des atomes froids ayant une distribution des vitesses étroite, correspondant à une plus grande cohérence des paquets d'ondes atomiques et permettant d'améliorer la dynamique.

20

Pour obtenir des bouffées d'atomes froids, on peut notamment utiliser une source du type ayant une cellule comportant des atomes de césium sous très faible pression, refroidis et maintenus par trois couples de faisceaux laser orientés suivant les trois axes d'un trièdre trirectangle, ayant une fréquence légèrement différente de la fréquence de résonance atomique pour l'élément choisi pour générer les bouffées (césium ou rubidium en général). Les groupes de laser sont complétés par des moyens de création d'un champ magnétique quadripolaire de confinement. La suppression du champ magnétique permet l'émission d'une bouffée. On trouvera une description de telles sources dans

25

30

l'article de Foot "Laser cooling and trapping of atoms" dans Contemporary

Physics, 1991, vol. 32, No. 6, pages 369-381 ou dans le brevet U.S. 5 274 232 déjà mentionné. La source sera commandée pour former des bouffées d'atomes lents, à une vitesse moyenne inférieure à 20 m/s, synchronisées avec les impulsions des moyens d'émission laser.

5 Dans un mode avantageux de réalisation, les moyens d'émission laser comportent une unique paire de lasers placés pour émettre dans des sens opposés, provoquant toutes les interactions et passant par les mêmes optiques pour toutes les interactions. En d'autres termes, les moyens de création simultanée des impulsions Raman dans les trois zones d'interaction peuvent être
10 constitués par un couple unique de lasers à impulsion fournissant deux faisceaux lumineux suffisamment larges pour traverser les trois zones. On peut prévoir des diaphragmes d'occultation partielle du faisceau large permettant de soustraire les bouffées à l'action du faisceau large entre les zones d'interaction.

15 Dans une variante, les faisceaux optiques de sortie des lasers sont fractionnés chacun par un élément dispersif ou réfractif suivi d'un ou de plusieurs éléments dioptriques ou catoptriques. Toutefois cette disposition a l'inconvénient que toute variation relative des éléments sera interprété dans la mesure comme un déphasage.

20 Les bouffées peuvent être émises dans toutes les directions, y compris suivant la verticale. En général cependant, la source est constituée et orientée de façon à émettre les bouffées d'atomes dans une direction inclinée par rapport à la verticale pour séparer davantage les zones d'interaction. Une vitesse de lancement de 1 à 5 m/sec sous un angle avec la verticale de quelques degrés, typiquement 5 à 10°, mais pouvant aller jusqu'à 50°, sera utilisable, notamment
25 pour un fonctionnement en gyromètre. Ce mode de lancement permet d'éviter un décalage vertical important entre les trois zones et assure en même temps leur séparation. Avec un angle sur la verticale dans le domaine indiqué plus haut la vitesse horizontale initiale est de quelques dizaines de centimètres par seconde.

30 La fourniture des impulsions laser peut être commandée de façon classique, notamment à l'aide d'obturateurs ou modulateurs acousto-optiques qui permettent de réaliser des impulsions brèves de puissance élevée.

Pour permettre de mesurer à la fois l'accélération et la vitesse de rotation autour d'une direction déterminée, l'invention propose également un appareil de mesure à interférométrie atomique, comprenant :

- deux sources d'émission d'atomes lents suivant une même trajectoire balistique dans l'espace sous vide, fournissant des atomes sur des trajectoires en coïncidence mais de sens opposé, inclinées sur la verticale,

- des moyens d'émission de faisceau laser localement transverse à la dite trajectoire pour provoquer des interactions successives sur chaque faisceau, comprenant :

- une première interaction pour provoquer une séparation spatiale des atomes de chaque faisceau suivant deux trajets divergents,

- au moins un effet miroir ramenant les trajets d'un même faisceau l'un vers l'autre,

- la dernière interaction permettant de recombinaison les paquets d'ondes atomiques provenant des deux trajectoires,

- des moyens de détection sensibles à l'état interne des atomes sur chaque faisceau.

Les moyens d'émission de faisceau laser sont avantageusement synchronisés avec des émissions de bouffées d'atomes de façon que le même couple de lasers provoque la première interaction et la recombinaison.

Dans ce cas, les moyens d'émission peuvent comprendre deux ensembles de couples de laser, l'un des ensembles fournissant des faisceaux orthogonaux au plan de la trajectoire et l'autre des faisceaux placés dans le plan de la trajectoire et localement perpendiculaire à la trajectoire; les moyens de détection sont alors synchronisés pour provoquer des fonctionnements alternés des deux ensembles pour calculer les vitesses de rotation autour d'au moins une direction orthogonale au plan de la trajectoire et l'accélération suivant les axes des faisceaux des deux ensembles.

Les caractéristiques ci-dessus, ainsi que d'autres, apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit de modes particuliers de réalisation de

l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs. La description se réfère aux dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :

- la figure 1, déjà mentionnée, montre une constitution connue de gyromètre ;
- les figures 2A et 2B, similaires à la figure 1, montrent la disposition de principe des éléments d'un appareil constituant gyromètre, respectivement dans les plans XZ et dans le plan XY ;
- la figure 3A montre l'échelonnement temporel de deux bouffées successives d'ordre n et $n+1$ et trois impulsions appliquées à chaque bouffée, dans une architecture qu'on peut qualifier de non jointive ;
- la figure 3B, similaire à la figure 3A, montre l'échelonnement temporel de deux bouffées dans une architecture qu'on peut qualifier de jointive ;
- la figure 4 est un schéma, où l'échelle n'est pas respectée pour plus de clarté, montrant une disposition possible des éléments d'un appareil constituant gyromètre et accéléromètre ;
- la figure 5 est un schéma montrant la projection de la trajectoire des atomes dans un plan orthogonal au plan initial de la trajectoire, lorsque les faisceaux sont eux-mêmes orthogonaux au plan de la trajectoire ;
- la figure 6 est un schéma montrant la projection de la trajectoire dans le plan initial de cette trajectoire, lorsque les faisceaux sont dirigés dans ce plan ;
- la figure 7 montre les projections de la trajectoire sur deux plans orthogonaux, dans le cas où les faisceaux sont dirigés orthogonalement au plan initial de la trajectoire.

Avant de décrire une mise en œuvre de l'invention, il est utile de rappeler le principe de fonctionnement du gyromètre à ondes de matière dont la description théorique a été donnée pour la première fois dans : ch. Bordé. "In Laser Spectroscopy X", édité par M. DUCLOY, E. GIACOBINO, G. CAMY (World Scientific, Singapour, 1992) pp. 239-245.

Dans la zone 14 (figure 1), l'impulsion Raman imprime la phase de la lumière sur l'atome. Sur les bras a et b constituant un interféromètre, il se produit des déphasages que l'on peut écrire sous la forme :

$$\phi_a = \phi_1 - \phi_2$$

$$\phi_b = \phi_2 - \phi_3$$

où les indices numériques indiquent les phases acquises dans les zones successives 14, 16 et 18.

5 La différence de phases acquise par les atomes à la sortie de l'interféromètre est alors égale à :

$$\phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3$$

10 En cas de rotation autour de l'axe sensible (centre de la zone 16), les deux bras de l'interféromètre provoquent des déphasages différents qui sont détectés par le capteur 20.

15 Les éléments du gyromètre peuvent avoir la disposition relative montrée schématiquement sur la figure 2, où l'échelle n'est pas respectée. Les numéros de référence utilisés sur la figure 2 sont les mêmes que sur la figure 1. Le gyromètre comporte une source d'atomes lents, d'un type permettant de projeter des bouffées d'atomes suivant une trajectoire balistique. Cette source 10 peut notamment être du genre décrit dans l'article de Foot, déjà mentionné, qui utilise un confinement magnéto-optique. Les zones d'interaction 14, 16 et 18 sont soumises à des impulsions provenant de lasers ayant un décalage de fréquence correspondant à une transition Raman. Les flèches F sur la figure 2 montrent la direction des faisceaux laser, oblique par rapport au plan XZ de la trajectoire 23 et avantageusement perpendiculaire au plan XZ. Une enceinte non représentée, reliée à une pompe à ultra-vide, permet de maintenir l'ensemble de la trajectoire des atomes sous un vide poussé, obtenu par exemple à l'aide d'une pompe ionique.

25 Des sources pulsées disponibles à l'heure actuelle permettent d'émettre des paquets ou bouffées d'atomes dont la dimension dans toutes les directions est de 1 cm environ. Les zones d'interaction peuvent en conséquence avoir une largeur faible. Du fait que les atomes sont lents, la synchronisation est relativement simple à réaliser par un circuit extérieur.

30 Les trois interactions successives peuvent être réalisées à l'aide d'une seule paire de lasers, en fractionnant le faisceau de sortie de chaque laser à

l'aide de miroirs semi-transparents. Mais un tel montage présente un inconvénient. Toute fluctuation de la phase de la lumière sera interprétée également comme une rotation. Il est en conséquence important que la lumière dans les trois zones ait une phase stable. Ce résultat peut être difficile à atteindre
5 lorsque les faisceaux de lumière dans les zones 14, 16 et 18 ont des origines différentes. Il en est de même si trois couples de lasers sont utilisés, même si on les stabilise à partir d'un même élément maître.

Ce problème est écarté si on crée les faisceaux provoquant les transitions Raman à partir de la même source laser pour chacune des trois zones. Dans le
10 cas illustré en figure 2, un même couple de deux faisceaux 22 recouvre l'ensemble des trois zones. Pour arriver à ce résultat, une solution simple consiste à utiliser des sources de lumière fournissant un faisceau large. Chacun de ces faisceaux peut être obtenu à partir d'un laser de faisceau étroit et d'une optique afocale d'agrandissement et éventuellement de correction de front d'onde
15 comportant des lentilles. Dans le cas fréquent où on utilise des diodes laser, la puissance disponible rend difficile d'utiliser un recouvrement constitué par une zone circulaire 22 de diamètre dépassant 5 cm. Mais il est également possible d'utiliser une optique conduisant à un faisceau non circulaire, concentrant la puissance dans certaines zones. D'autres types de laser permettent d'avoir des
20 faisceaux de plus grand diamètre et de puissance suffisante, jusqu'à 20 cm environ.

En général, la lumière fournie par le générateur, tel qu'une diode laser, peut être commandée par un modulateur acousto-optique suivi d'une optique d'élargissement de faisceau. Entre le modulateur et l'optique peut être placé un
25 filtre spatial, tel qu'une fibre optique compatible avec le modulateur.

La partie du dispositif qui contient la sortie de la source et le trajet des atomes est placé dans une enceinte sous ultra-vide, munie d'un blindage magnétique. Les faisceaux laser pénètrent dans cette enceinte par des hublots.

Si une mesure permanente de la rotation n'est pas nécessaire, on peut
30 utiliser un fonctionnement "non jointif", schématisé sur la figure 3A. La mesure

s'effectue par séquences successives, impliquant chacune l'envoi de trois impulsions P1, P2, P3 faisant suite à l'envoi d'une bouffée à l'instant t_n, t_{n+1}, \dots

Pour effectuer une mesure quasi continue des rotations, les séquences de mesure doivent être pratiquement jointives (figure 3B). Pour cela, les faisceaux qui illuminent à la fois les trois zones sont déclenchés pour fournir, au cours de la mesure d'ordre n , trois impulsions P1, P2 et P3 avec un échelonnement déterminé en fonction de la vitesse horizontale et de la largeur des faisceaux. Dans la pratique, des considérations d'encombrement conduiront généralement à un écartement entre P1 et P3 ne dépassant pas 500 ms et souvent d'environ 100 ms. Ces impulsions sont émises, à partir de l'instant t_n d'envoi d'une bouffée, avec un retard qui dépend lui aussi de la vitesse des atomes. Les instants t_n et t_{n+1} d'envoi de deux bouffées successives sont décalés de l'intervalle de temps qui sépare P1 et P3, de façon que la troisième impulsion pour la bouffée n constitue la première impulsion pour la bouffée $n+1$. Les faisceaux peuvent être limités par des diaphragmes tels que 24 évitant toute interaction entre les zones.

La détection du déphasage peut être effectuée par des moyens non représentés de nature connue, tels que l'utilisation d'un laser accordé à la résonance et permettant de mesurer le nombre des atomes dans un état donné en provoquant une fluorescence sur une photodiode.

A titre indicatif, les principaux paramètres d'un gyromètre ayant la constitution qui vient d'être décrite peuvent être les suivants.

Une source utilisant un piège magnéto-optique, utilisée à la surface de la terre, permet de lancer des bouffées d'atomes ayant une vitesse moyenne comprise entre quelques centimètres par seconde et quelques mètres par seconde. Dans la pratique, on utilisera fréquemment des jets ayant une vitesse initiale verticale de 2,4 m/s et une vitesse horizontale de 30 cm/s. Les faisceaux de création de transitions Raman, lorsqu'un seul couple est utilisé, peuvent avoir un diamètre d'environ 5 cm. Cette taille est un compromis entre une section de faisceaux la plus grande possible (de façon à augmenter la surface soumise à l'effet Sagnac) et les puissances que permettent d'obtenir les diodes laser. Avec

d'autres types de laser, des diamètres plus importants peuvent être utilisés. Par ailleurs, on peut utiliser des optiques donnant aux faisceaux traversés par la trajectoire une section non circulaire.

Les durées de parcours entre deux interactions successives peuvent être de l'ordre de 50 ms. Elles dépendent de la vitesse horizontale des atomes et de la largeur que l'on peut accepter pour les faisceaux. Plus la durée est importante et plus la sensibilité est élevée. Avec des faisceaux de grand diamètre, on peut arriver à des intervalles d'environ 500 ms entre la première et la troisième interaction. Les impulsions de lumière auront une durée qui dépend de la puissance des lasers et la distribution transverse en vitesse des atomes.

Au lieu d'utiliser une séquence $\pi/2, \pi, \pi/2$, il est possible de soumettre une bouffée d'atomes à un nombre d'interactions supérieur, ce qui correspond à ajouter par exemple un jeu de zones 14, 16, 18 au schéma montré en figure 1.

Lorsqu'un gyromètre du genre qui vient d'être décrit est utilisé sur terre, il mesure non seulement sa rotation propre, mais aussi la rotation de la terre, dont il doit être tenu compte soit par voie théorique, soit en effectuant une mesure dans des conditions d'absence complète de rotation entre deux mesures successives.

L'invention permet également de réaliser un appareil remplissant à la fois les fonctions de mesure de la gravité (ou plus généralement de l'accélération) et de la rotation. La figure 4 montre schématiquement un tel appareil. La source est prévue pour lancer des bouffées successives d'atomes suivant une trajectoire 23 dans un plan vertical XZ. Un premier couple de générateurs laser 30 fournit deux faisceaux opposés, dirigés orthogonalement au plan XZ. Un second couple de générateurs 32 fournit un couple de faisceaux opposés, orienté orthogonalement à la trajectoire et dans le plan XZ. Un circuit de synchronisation et de commande 34 permet de commander l'émission des bouffées d'atomes et l'échelonnement d'impulsions de transition Raman, alternativement à l'aide des générateurs laser 30 et des générateurs laser 32.

Dans le cas illustré sur la figure 4, les zones d'interaction sont les mêmes pour les faisceaux dirigés suivant l'axe Y et les faisceaux dirigés suivant l'axe Z.

Mais on peut décaler les zones d'action des paires de faisceaux le long de la trajectoire.

Lors de l'utilisation de l'appareil en mettant en œuvre les faisceaux laser 32 orientés suivant Z (flèche F_2), l'appareil est sensible à la composante de la rotation de l'appareil autour de l'axe Y. En effet, l'aire orientée indiquée par les hachures et délimitée par les bras de l'interféromètre est orientée suivant la direction Y (figure 6). La projection de l'aire orientée dans les plans XZ et YZ étant nulle, l'appareil n'est alors pas sensible aux rotations autour respectivement des axes Y et X. De plus, l'appareil est alors sensible à une accélération suivant la direction des faisceaux laser, c'est-à-dire la direction Z. Lorsque, au contraire, la mesure est effectuée en utilisant les générateurs laser 30 orientés suivant la direction Y (flèche F_1), l'aire de l'interféromètre est orientée suivant la direction Z (figure 7). L'interféromètre est alors sensible à la composante de la rotation autour de l'axe Z et à l'accélération suivant l'axe Y des faisceaux laser. Les projections de l'aire orientée dans les plans YZ et XZ étant nulles, l'appareil est insensible aux rotations autour respectivement des axes X et Y.

Il est également possible, dans la configuration utilisant les faisceaux laser 30 (flèche F_1), d'obtenir la composante de la rotation autour de l'axe X. Pour cela, il est nécessaire de changer la séquence des impulsions laser de façon à ce que la projection de l'aire orientée dans le plan YZ, pendant la partie ascendante ne s'annule pas avec elle pendant la partie descendante comme c'est le cas dans la figure 7. Pour cela, on réalise les deux premières impulsions Raman (impulsion $\pi/2$ puis π) pendant la partie ascendante de façon à ce que les trajectoires se rejoignent au moment où elles atteignent le sommet (voir figure 5) ; on réalise ensuite à nouveau deux impulsions Raman (impulsion $\pi/2$ puis π) pendant la phase descendante. Dans cette configuration, l'interféromètre est uniquement sensible à la composante de la rotation autour de l'axe X, mais pas aux autres composantes de la rotation ni aux accélérations.

La figure 7 déjà mentionnée est un schéma montrant l'effet de rotations et d'accélérations dans le cas où les faisceaux sont dirigés suivant les flèches F_1 .

La figure montre la projection de la trajectoire dans les plans XY et YZ. La projection dans le plan XY montre que la composante de la rotation suivant l'axe z fournit un signal car l'aire circonscrite orientée délimitée par les bras n'est pas nulle. Une accélération suivant les flèches F_1 , c'est-à-dire selon l'axe Y, fournit également un signal. En revanche, la composante de la rotation suivant l'axe X ne donne pas de signal, car l'aire circonscrite orientée est nulle, comme indiqué par les deux zones délimitées par des traits continus et interrompus.

Le déphasage accumulé entre les deux bras de l'interféromètre dépend à la fois de la composante de l'accélération suivant la direction des faisceaux laser et de la composante de la rotation autour de la normale à l'aire de l'interféromètre. Pour discriminer entre ces deux contributions, on peut utiliser le fait qu'elles ont une dépendance différente envers la vitesse des atomes. Contrairement au déphasage dû à l'accélération qui ne dépend pas de la vitesse des atomes, celui dû à la rotation en dépend de telle façon qu'il est de signe opposé pour des trajectoires identiques, mais parcourues en sens opposé. En réalisant deux interféromètres utilisant deux sources parcourant la même trajectoire en sens opposé, on a accès à la contribution due à l'accélération en faisant la demi-somme des deux déphasages et celle due à la rotation en faisant leur demi-différence.

On peut résumer les différentes configurations permettant d'accéder à cinq des six grandeurs en notation et une accélération :

	Direction des lasers	Séquence	Opération sur les déphasages
Rotation X	Y (F1)	3 impulsions dans la phase ascendante	$\phi_1 - \phi_2$
Rotation Y	Z (F2)	Symétrie / sommet	$\phi_1 - \phi_2$
Rotation Z	Y (F1)	Symétrie / sommet	$\phi_1 - \phi_2$
Accélération Y	Y (F1)	Symétrie / sommet	$\phi_1 + \phi_2$
Accélération Z (gravimètre)	Z (F2)	Symétrie / sommet	$\phi_1 + \phi_2$

Dans ce tableau, ϕ_1 est le déphasage obtenu pour le jet atomique 1 et ϕ_2 celui pour le jet atomique 2.

5 Si la rotation Ω à laquelle est soumis l'appareil est autour d'un axe ne passant pas par le centre de symétrie de l'interféromètre, l'appareil détecte alors la rotation Ω plus un terme d'accélération correspondant à l'accélération centrifuge. Si la distance entre l'axe de rotation et le centre de symétrie de l'appareil vaut d , l'accélération centrifuge mesurée vaut $a = d\Omega^2$ et il est possible de tenir compte de ce terme dans le calcul.

REVENDICATIONS

1. Appareil de mesure de grandeurs inertielles à interférométrie atomique, comprenant :

5 - au moins une source d'émission d'atomes lents suivant une trajectoire balistique dans un espace sous vide,

- des moyens d'émission de faisceau laser vers la dite trajectoire pour provoquer des interactions successives avec les atomes lents provoquant des transitions Raman, les interactions provoquant successivement:

10 - une séparation spatiale des atomes suivant deux trajets divergents,

- au moins un effet miroir ramenant les trajets l'un vers l'autre,

- une recombinaison des atomes provenant des deux trajets, et

- des moyens de détection sensibles à l'état interne des atomes,

15 caractérisé en ce que les moyens d'émission des faisceaux laser sont synchronisés de façon qu'un paquet d'atomes lents subisse la première interaction alors que la dernière interaction sur des atomes provenant de la même source et/ou d'une source fournissant des atomes sur une trajectoire en coïncidence mais de sens opposé, est en cours sur un paquet précédent.

20 2. Appareil de mesure suivant la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens d'émission laser comportent une unique paire de lasers placés de façon à émettre vers la trajectoire dans des sens opposés, provoquant toutes les interactions, chaque faisceau passant par les mêmes optiques pour toutes les interactions.

25 3. Appareil de mesure suivant la revendication 1, caractérisé en ce que la source formant des bouffées d'atomes à une vitesse inférieure à 20 m/s, synchronisées avec les impulsions des moyens d'émission laser.

30 4. Appareil de mesure suivant la revendication 1, caractérisé en ce que la direction initiale de la trajectoire est comprise entre 0° et 50° sur la verticale et dirigée vers le haut.

5. Appareil de mesure selon la revendication 1, comportant deux sources d'émission projetant les bouffées entre 5° et 50° par rapport à la verticale ascendante et avec des composantes horizontales de la vitesse initiale dans des orientations différentes.

5 6. Appareil de mesure d'accélération et de vitesse de rotation à interférométrie atomique, comprenant :

- deux sources d'émission d'atomes lents suivant une même trajectoire balistique dans l'espace sous vide, fournissant des atomes sur des trajectoires en coïncidence mais de sens opposé, inclinées sur la verticale,

10 - des moyens d'émission de faisceau laser localement transverse à la dite trajectoire pour provoquer des interactions successives sur chaque faisceau, comprenant :

- une première interaction pour provoquer une séparation spatiale des atomes de chaque faisceau suivant deux trajets divergents,

15 - au moins un effet miroir ramenant les trajets d'un même faisceau l'un vers l'autre,

- une dernière interaction permettant de recombinaison les paquets d'ondes,

20 - des moyens de détection sensibles à l'état interne des atomes sur chaque faisceau,

les moyens d'émission de faisceau laser étant synchronisés de façon que le même couple de lasers provoque la première interaction et la recombinaison sur l'autre faisceau.

25 7. Appareil de mesure suivant la revendication 6, caractérisé en ce que les moyens d'émission comprennent deux ensembles de couples de laser, l'un des ensembles fournissant des faisceaux orthogonaux au plan de la trajectoire et l'autre des faisceaux dans le plan de la trajectoire et localement perpendiculaire à la trajectoire, les dits moyens de détection étant synchronisés avec des fonctionnements alternés des deux ensembles pour calculer les vitesses de rotation autour d'au moins une direction orthogonale au plan de la trajectoire et l'accélération suivant les axes des faisceaux des deux ensembles.

30

8. Appareil de mesure selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la source ou chaque source d'atomes est une source d'atomes froids.

FIG.1.

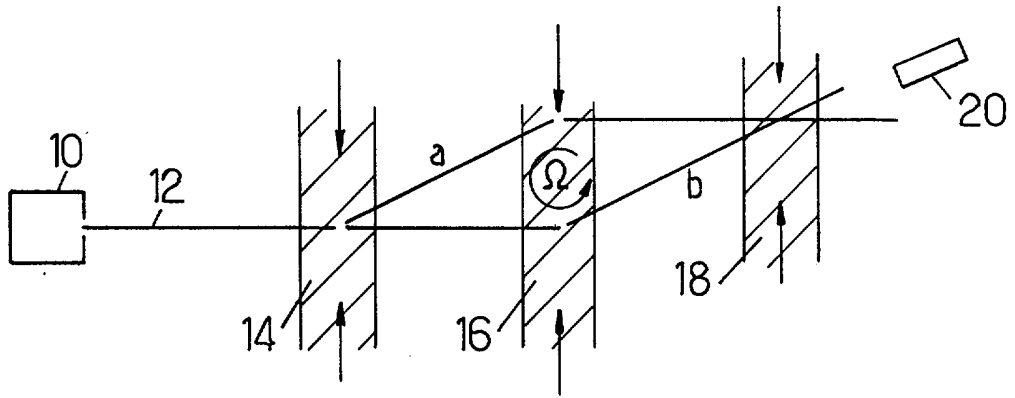


FIG.6.

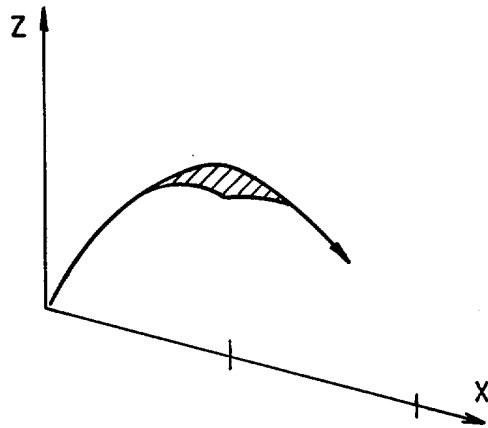
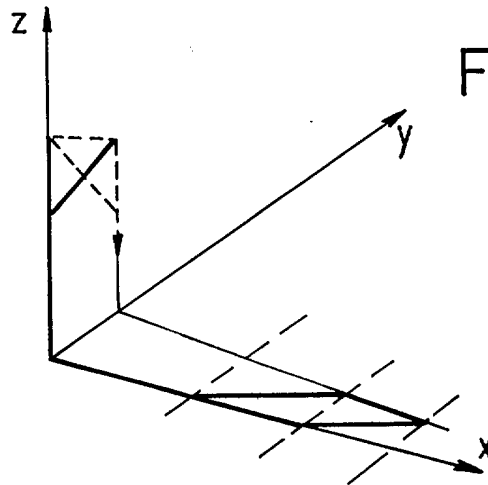


FIG.7.



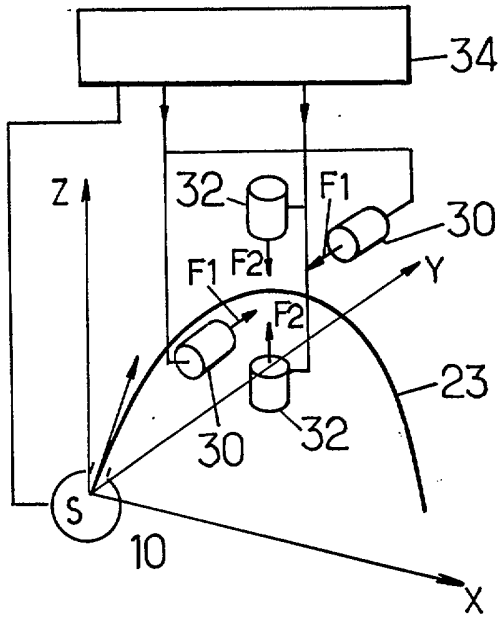


FIG. 4.

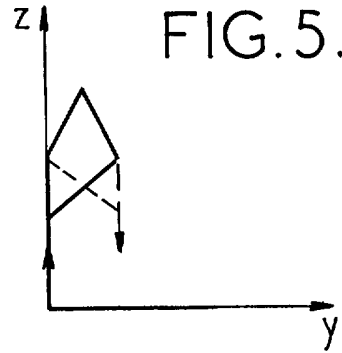


FIG. 5.

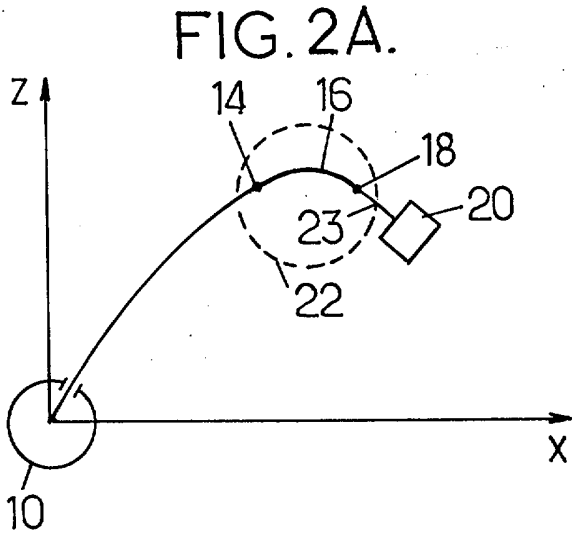


FIG. 2A.

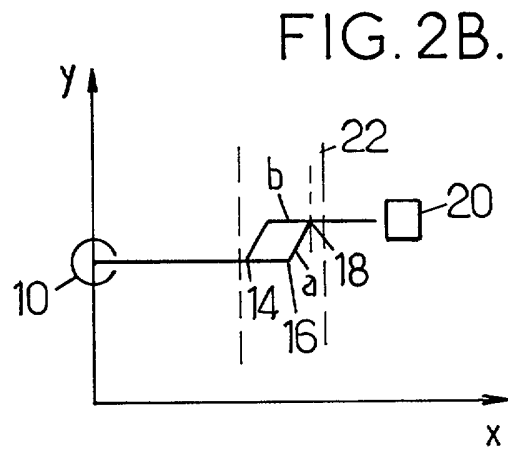


FIG. 2B.

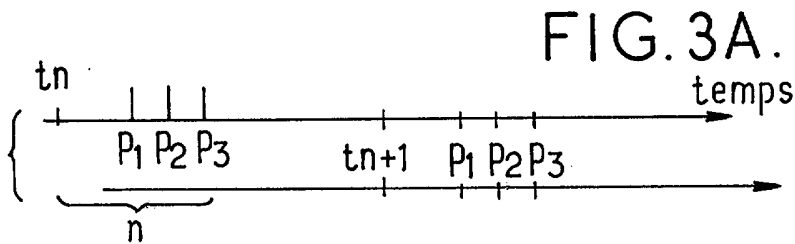


FIG. 3A.

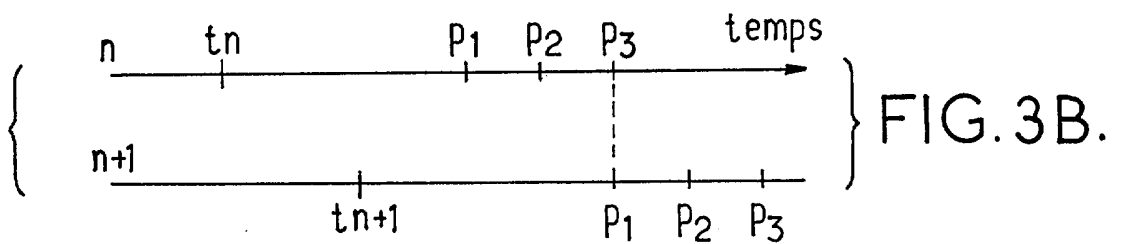


FIG. 3B.

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-17 et R.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

Après l'accomplissement de la procédure prévue par les textes rappelés ci-dessus, le brevet est délivré. L'Institut National de la Propriété Industrielle n'est pas habilité, sauf dans le cas d'absence **manifeste** de nouveauté, à en refuser la délivrance. La validité d'un brevet relève exclusivement de l'appréciation des tribunaux.

L'I.N.P.I. doit toutefois annexer à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention. Ce rapport porte sur les revendications figurant au brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DU PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

- Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.
- Le demandeur a maintenu les revendications.
- Le demandeur a modifié les revendications.
- Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n' étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.
- Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.
- Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITÉS DANS LE PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

- Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.
- Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.
- Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.
- Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1.ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION	
Référence des documents (avec indication, le cas échéant, des parties pertinentes)	Revendications du brevet concernées
NEANT	
2.ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL	
<p>GUSTAVSON T L ET AL: "Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope" INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EXPERIMENTAL GRAVITATION, SAMARKLAND, UZBEKISTAN, 16-21 AUG. 1999, vol. 17, no. 12, pages 2385-2398, XP002192358 Classical and Quantum Gravity, 21 June 2000, IOP Publishing, UK ISSN: 0264-9381</p> <p>US 5 274 232 A (CHU STEVEN ET AL) 28 décembre 1993 (1993-12-28)</p>	
3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES	
Référence des documents (avec indication, le cas échéant, des parties pertinentes)	Revendications du brevet concernées
NEANT	