



República Federativa do Brasil  
Ministério da Indústria, Comércio Exterior  
e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102015007944-3 A2

(22) Data do Depósito: 09/04/2015

(43) Data da Publicação: 07/11/2017



(54) **Título:** DISPOSITIVO E MÉTODO PARA MEDIDA DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL

(51) **Int. Cl.:** G01V 7/00

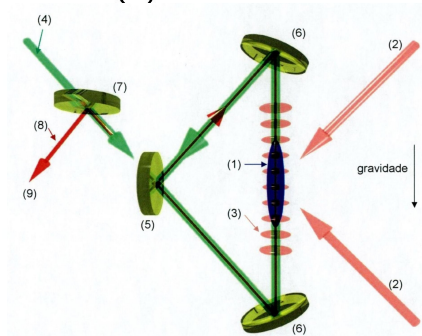
(52) **CPC:** G01V 7/00

(73) **Titular(es):** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

(72) **Inventor(es):** PHILIPPE WILHELM COURTEILLE; ROMAIN PIERRE MARCEL BACHELARD

(74) **Procurador(es):** MARIA APARECIDA DE SOUZA

(57) **Resumo:** DISPOSITIVO E MÉTODO PARA MEDIDA DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL. A presente invenção refere-se a dispositivo e método, em especial a um gravímetro baseado em interferometria atômica, no qual os átomos são resfriados até uma temperatura em que formam uma onda de matéria coerente e depois são transferidos dentro de uma onda estacionária vertical de luz quase-ressonante com uma transição atômica. Os átomos são colocados dentro de uma cavidade óptica anular (23) bombeada em uma direção por um feixe laser (18) e executam oscilações de Bloch, cuja frequência é estritamente proporcional à aceleração gravitacional. O método compreende as etapas de: a) Preparar um feixe de átomos frios; b) Capturar este feixe atômico por uma armadilha magneto-óptica operada numa transição atômica larga e resfriá-lo para temperaturas em torno de 5 mK; c) Resfriar os átomos ainda mais por uma armadilha magneto-óptica operada numa transição atômica fina para temperaturas em torno de 300 nK; d) Transferir a onda de matéria para onda estacionária de luz; e) Incitar os átomos a executar oscilações de Bloch devido à aceleração gravitacional; f) Injetar um las(...)



## “DISPOSITIVO E MÉTODO PARA MEDIDA DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL”

### Campo da invenção

[1] A presente invenção refere-se a dispositivo e método, em especial a um gravímetro baseado em interferometria atômica com monitoramento contínuo e estabilização ativa, para utilização nas áreas de Física, Química, Engenharia, Geografia e Geologia, visando à medida da aceleração gravitacional.

### Fundamentos da invenção e estado da técnica

[2] Gravímetros são dispositivos que medem a atração gravitacional terrestre. A precisão impressionante de gravímetros contemporâneos faz com que se tornem ferramentas úteis para uma ampla gama de aplicações na indústria e em pesquisas fundamentais. As aplicações incluem:

- levantamento gravimétrico de alta precisão ao longo de linhas sísmicas;
- identificação de estruturas geológicas com reservas de petróleo e gás;
- identificação e mapeamento de zonas e falhas metamórficas;
- monitoramento da segurança geodinâmica de depósitos de hidrocarbonetos;
- monitoramento de ondas de maré.

[3] Aplicações industriais: Uma das aplicações mais interessante de sensores gravitacionais é a *gradiometria de gravidade*. Essa técnica permite a medição de deformações locais do potencial gravitacional homogêneo da Terra e tem aplicações interessantes incluindo a detecção de concentrações de *massas escondidas* (ou de ausência delas), isto é, subterrânea ou subaquática. Por exemplo, enterrados embaixo de estradas

públicas, sensores gravitacionais poderiam servir para pesagem de caminhões.

[4] Na engenharia civil, eles seriam úteis para detecção de cavernas escondidas, de obstáculos no chão ou de sítios de interesse arqueológico, reduzindo os riscos de danificar infraestrutura enterrada existente. Grande parte desta infraestrutura é desconhecida e mesmo quando aparece em registros legais, está muitas vezes posicionada erroneamente. Assim, no Reino Unido estima-se que quatro milhões de buracos são cavados nas ruas cada ano, sem encontrar a infraestrutura a qual se destina, causando inconveniência pública e custos desnecessários.

[5] Também, sensores gravitacionais são importantes na prospecção não invasiva de campos petrolíferos, reservatórios de gás e depósitos minerais. Com sensibilidades melhoradas eles permitirão uma melhor utilização dos reservatórios atuais. Atualmente, a exploração está limitada a no máximo 40% do total devido a uma falta de conhecimento de como a água bombeada para o chão irá empurrar o óleo em poços vizinhos deixando manchas de óleo nas rochas.

[6] Gravímetros por interferometria atômica: A invenção na década de 1980 de técnicas permitindo o aprisionamento de nuvens atômicas e do seu resfriamento por laser até temperaturas extremamente baixas, iniciou o desenvolvimento da interferometria de onda de matéria atômica. De fato, para temperaturas abaixo de alguns 100 nanoKelvin, nuvens de átomos formam uma onda de matéria caracterizada por seu comprimento de onda de Broglie. Em analogia com interferômetros ópticos, ondas de matéria podem ser divididas, refletidas e recombinadas por pulsos de laser transferindo momento para uma parte da onda de matéria, produzindo assim sinais de interferência. Esquemas diferentes foram usados. Por exemplo, sequências de pulsos de laser de tipo

Ramsey, são a base de interferômetros atômicos de tipo Mach-Zehnder ou de Ramsey-Bordé. Expondo um tal interferômetro à aceleração gravitacional, medindo a interferência da onda de matéria, o dispositivo pode ser usado como gravímetro [1]. Medições de gravidade com sensibilidades da ordem de  $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  em tempos de integração de 1 s e precisões em torno de  $4 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$  foram obtidas [2]. Gradientes de gravidade têm sido medidas com sensibilidade de  $4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  em 1 s de tempo de integração. Precisas mais altas podem ser alcançadas com maiores tempos de integração.

[7] Aplicação de gravímetros atômicos: Essas novas técnicas de interferometria atômica são interessantes tanto para pesquisa fundamental quanto para muitas aplicações práticas, incluindo geodésia, metrologia, engenharia de prospecção ou para prestação de auxílio de navegação em submarinos [3,4]. Medições tão precisas têm repercussões importantes em aplicações geofísicas, incluindo a previsão de terremotos [5], estudos do aquecimento global e a medição de microgravidade em torres de queda e no espaço. Interferometria atômica é usada para medições precisas da aceleração gravitacional [1,6,7], de gradientes de gravidade no campo gravitacional da Terra [8,9] e em giroscópios [10,11]. Sistemas transportáveis estão sendo desenvolvidos com desempenho similar para futuros experimentos no espaço [12].

[8] Em gravímetros tradicionais, uma massa de ensaio está elevada no campo de gravitação, então, mede-se a aceleração gravitacional, antes de deixá-la cair, o que leva um certo tempo. Para evitar que este procedimento limite o tempo de integração dos sinais úteis, foram inventadas técnicas permitindo reciclar rapidamente a massa de ensaio. No caso de ondas de matéria, a técnica mais promissora é a observação das oscilações de Bloch executadas por átomos localizados dentro de um potencial

periódico unidimensional vertical gerado por dois feixes de laser contrapropagantes.

[9] Oscilações de Bloch: A ideia subjacente às oscilações de Bloch é a seguinte. Átomos acelerados no campo gravitacional, imediatamente depois de ter atingido um momento correspondendo ao momento de recuo fotônico, absorvem um fóton do laser contrapropagante e emitem este fóton dentro do feixe de laser copropagante. Este processo reflete o movimento dos átomos como se eles tivessem encontrado um trampolim [16,17]. Os átomos saltam muitas vezes neste trampolim executando um movimento periódico chamado de oscilação de Bloch e, idealmente, nunca ultrapassando o momento de um recuo fotônico.

[10] A frequência das oscilações de Bloch é estritamente proporcional à massa do átomo, à aceleração gravitacional e à periodicidade da onda estacionária, sendo tipicamente da ordem de 100-2000 Hz. Taxas de amortecimento muito baixas [18,19] permitiram gravar 10000 ciclos de oscilações de Bloch em mais do que 20 s. Com tempos de coerência tão longos, as oscilações de Bloch de átomos frios tornam-se viáveis para medições de forças aceleradoras com alta precisão, por exemplo, para medir a gravidade. Elas combinam as vantagens de alta sensibilidade e resolução espacial micrométrica [20,21]. Oscilações de Bloch com longos tempos de coerência foram observadas recentemente com átomos frios [13] e condensados de Bose-Einstein em redes ópticas [14,15]. Recentemente, novos gravímetros baseados na detecção de oscilações de Bloch com altíssimas resoluções foram desenvolvidos [18,19,21].

[11] Medição das oscilações de Bloch: Embora oscilações de Bloch permitam, em princípio, largas bandas de detecção da ordem da frequência de oscilação, em todas as experiências atuais as oscilações são detectadas de maneira destrutiva. Tal detecção é realizada por análise da velocidade instantânea de uma nuvem

atômica fotografando a sua posição após um tempo de voo. Infelizmente, para cada medição da fase atual da oscilação, uma nova nuvem atômica deve ser preparada e sujeita a oscilações de Bloch. Variando o tempo da evolução, as oscilações de Bloch podem ser reconstruídas a partir das quais, baseado num grande número de medições, a força de aceleração pode ser extraída.

[12] O processo é trabalhoso e sofre de incertezas e flutuações nas condições iniciais da nuvem. Por isso, a largura da banda de detecção é limitada pelo tempo de repetição da sequência experimental, que no melhor dos casos fica em torno de 10 ms [Ref. 22 e US 8,941,053], o que também significa que a relação sinal-ruído atingível em um dado tempo é limitado. Para medições do campo gravitacional da Terra, essa limitação não é uma restrição severa, porque suas variações (por exemplo, oscilações de marés) são lentas e de grandes escalas, ou seja, o tempo de integração pode ser longo. No entanto, para medições da gravidade local, uma resposta mais rápida do gravímetro é desejável.

[13] Ganho por cavidades ópticas: O processo de medição poderia ser dramaticamente acelerado, se ao invés de fazer imagens sucessivas do movimento atômico, o impacto do movimento atômico sobre um campo de luz for monitorado de maneira contínua. De fato, experiências recentes [23-25] demonstraram que átomos se deslocando em uma onda de luz estacionária podem modificar a amplitude ou fase da onda de luz, desde que tal onda esteja suficientemente independente dos feixes de laser. Uma maneira de satisfazer este requisito é deixar a onda se desenvolver dentro de uma cavidade óptica anular de alta qualidade. O papel da cavidade consiste em ampliar a interação dos átomos com a luz, pois quando os átomos oscilam dentro do ressonador, a retroação modula a fase e a intensidade da luz armazenada na cavidade [26]. Uma proposta recente [27] sugere a

utilização de cavidades anulares operadas no regime da eletrodinâmica quântica em cavidade (CQED). Infelizmente, um problema ocorre devido à interação dos átomos com a luz armazenada na cavidade, pois essa interação é acompanhada por uma força acelerando os átomos, perturbando as oscilações de Bloch e, conseqüentemente, falsificando a medida da aceleração gravitacional. Por isso, um processo permitindo uma auto-estabilização das oscilações seria altamente desejável.

[14] Há gravímetros baseados em oscilações de Bloch de átomos numa onda estacionária de luz realizada por um feixe laser vertical retrorefletido, mas sem cavidade anular [22] e, portanto, sem monitoramento contínuo e sem estabilização do movimento atômico. Do outro lado, existe uma proposta teórica de monitoramento contínuo das oscilações por uma cavidade anular [21]. Baseada num modo de funcionamento diferente, essa proposta também não permite auto-estabilização do movimento atômico. Em contraste, a nossa proposta atende concomitantemente as duas propriedades desejadas, de forma a aumentar a precisão da medida gravitacional.

[15] Na patente US 4,874,942 de J.F. Claussen é proposto o uso de interferômetros de ondas de matéria atômica como sensores inerciais. Um feixe atômico é dividido e recombinado por uma sequência de pulsos de luz. Na área de detecção observa-se uma interferência de onda de matéria que pode ser mapeada facilmente através do estado de excitação dos átomos. Assim, a amostra é destruída com a detecção.

[16] Já o documento US 5,274,231 desenvolvido por S. Chu e M. Kasevich é o mais importante na área da gravimetria atômica (vide também [6]). Um chafariz atômico joga uma amostra de átomos ultrafrios para cima onde ela é excitada por uma sequência de pulsos de luz excitando transições Raman do tipo Ramsey-

Bordé. Entretanto, assim como no pedido mencionado anteriormente, a amostra é destruída com a detecção.

[17] A ideia proposta na US 8,941,053 também baseia-se no interferômetro atômico de Ramsey-Bordé, mas representa um melhoramento da taxa de repetição por uma técnica que permite a reciclagem de átomos usados em ciclos anteriores. Taxas de repetição de 10 ms foram alcançadas. No entanto, uma nova amostra de átomos deve ser preparada e resfriada antes de cada medida.

[18] M. Inguscio e G. Modugno propõem na patente EP 1730553A1 um interferômetro atômico baseado em oscilações de Bloch para observação de uma força inercial. Apesar do fato que a frequência das oscilações responde instantaneamente às variações temporais da força, o método de observação não permite monitoramento contínuo das oscilações de Bloch com uma única amostra de átomos, mas precisa da preparação de uma nova amostra para cada medida de um ponto da oscilação.

[19] Assim, não há até o momento, invenção similar à presente proposta, ou seja, um dispositivo e método baseados em interferometria atômica, que permita monitorar continuamente e **ao vivo** o movimento oscilatório de uma onda de matéria e a auto-estabilização das oscilações de Bloch.

#### Breve descrição da invenção

[20] A invenção refere-se a um gravímetro baseado em interferometria atômica, no qual os átomos são resfriados até uma temperatura em que formam uma onda de matéria coerente e depois são transferidos dentro de uma onda estacionária vertical de luz quase-ressonante com uma transição atômica. Os átomos são colocados dentro de uma cavidade óptica anular bombeada em uma direção por um feixe laser e executam oscilações de Bloch, cuja frequência é estritamente proporcional à aceleração

gravitacional. O dispositivo permite monitorar continuamente e *ao vivo* o movimento oscilatório da onda de matéria atômica através do seu impacto sobre os campos de luz da cavidade. O dispositivo e método propostos também levam à estabilização da periodicidade do seu movimento. O monitoramento contínuo e a estabilização das oscilações de Bloch levam ao aumento da precisão da medida.

#### Vantagens da invenção

[21] A invenção fornece um mecanismo que amplia o impacto do movimento oscilatório dos átomos sobre o campo de luz armazenado na cavidade, de maneira a produzir *ao vivo* um sinal contínuo proporcional à força gravitacional.

[22] Ainda, fornece um mecanismo de retroação da cavidade sobre os átomos, que ativamente não só cancela a força exercida pela luz sobre os átomos, mas além disso, compensa perturbações devidas a efeitos exteriores, como colisões ou ruído na amplitude ou fase da onda estacionária confinando os átomos.

[23] Dessa forma, a presente invenção apresenta aumento da precisão da medida desejada.

#### Breve descrição das figuras

[24] O objetivo da invenção, juntamente com vantagens adicionais da mesma, poderá ser melhor entendido mediante referência às figuras anexadas e às seguintes descrições:

[25] Figura 1 - Esquema do dispositivo, apresentando a cavidade anular (23) que consiste de dois espelhos de alta refletividade (6) e um de acoplamento (5). Ela interage com átomos de  $^{88}\text{Sr}$  (1) confinados por uma onda estacionária de luz (2).

[26] Figura 2 - Simulação da dinâmica. Gráfico superior: Evolução temporal do momento médio dos átomos  $\langle p \rangle_{\text{lab}}$  no sistema inercial do laboratório com  $N=40000$  átomos. Gráfico

inferior: Evolução do número médio de fótons  $|\alpha|^2$  dentro do modo prova da cavidade.

[27] Figura 3 - Fluxograma com as etapas do método proposto.

[28] Figura 4 - Montagem completa da câmara de vácuo.

[29] Figuras 5 e 6 - Esquema e foto da câmara de vácuo principal.

[30] Figuras 7 e 8 - Esquema e foto da cavidade anular mostrando os três espelhos e a estrutura de suporte da cavidade.

[31] Figura 9 - Esquema das fontes de luz (caixas azuis), das câmaras de vácuo (caixas cinzas) e as eletrônicas Pound-Drever-Hall de travamento de frequência e de detecção e monitoramento do feixe de luz carregando o sinal das oscilações de Bloch (caixas verdes).

#### Descrição detalhada da invenção

[32] Embora a presente invenção possa ser suscetível de diferentes concretizações, é mostrado nos desenhos e na seguinte discussão detalhada, uma concretização preferida com o entendimento de que a presente descrição deve ser considerada uma exemplificação dos princípios da invenção e não pretende limitar a presente invenção ao que é aqui ilustrado e descrito.

[33] O conceito inventivo da presente invenção é esquematizado na figura 1. Uma nuvem de átomos (1) é aprisionada e resfriada até uma temperatura abaixo do limite do recuo fotônico, isto é, tipicamente em torno de 300 nK, não sendo necessário que este seja um condensado de Bose-Einstein. Após, os átomos são carregados para uma armadilha óptica periódica (3), que consiste em dois feixes de laser cruzados (2). O comprimento de onda do laser e o ângulo de cruzamento  $\beta$  são calculados para formar uma onda de luz estacionária vertical com uma periodicidade, que corresponde à metade do comprimento de onda

da transição atômica de intercombinação em 689 nm. Uma cavidade anular com três espelhos (5,6) fica montada em torno da nuvem atômica.

### **Dispositivo para medida da aceleração gravitacional**

[34] Em um primeiro aspecto, a invenção provê um dispositivo para medida da aceleração gravitacional.

[35] O dispositivo proposto é um gravímetro baseado em interferometria atômica. Os átomos são resfriados até uma temperatura em que eles formam uma onda de matéria coerente e depois são transferidos dentro de uma onda estacionária vertical de luz quase-ressonante com uma transição atômica. Aqui, os átomos executam oscilações de Bloch, cuja frequência é estritamente proporcional à aceleração gravitacional.

[36] No presente pedido, propomos construir em torno da nuvem atômica (1) uma cavidade óptica anular (23) de tal maneira que um dos braços da cavidade seja alinhado à onda estacionária vertical (3). Quando um dos dois modos contrapropagantes da cavidade é bombeado por um feixe laser (4), a luz espalhada pelos átomos para o modo inverso (8), chamado de prova, traz assinaturas da velocidade dos átomos.

[37] Dessa forma, observando o modo prova (8), o dispositivo permite monitorar continuamente o movimento oscilatório dos átomos, coletar informação sobre a periodicidade das oscilações de Bloch e, por este meio, sobre a força (ou variações temporais da mesma) agindo sobre os átomos. Como a medida é feita ao vivo numa mesma onda de matéria, a informação pode ser coletada mais rapidamente do que usando técnicas convencionais requerendo que cada medida seja feita com uma onda de matéria novamente preparada. Isso permite ainda, melhorar a relação sinal-ruído que pode ser obtida em tempos de integração mais curtos.

### Conceito da câmara de vácuo

[38] Os átomos devem ser preparados, juntamente com a cavidade (23) dentro de uma câmara de vácuo (15) e (19). Colisões dos átomos com moléculas do gás residual limitam o tempo de vida da onda de matéria e, portanto, o tempo de medida útil para o sensor inercial. Por isso, é essencial alcançar pressões extremamente baixas. A figura 4 mostra um esquema possível para a montagem da câmara de vácuo. Ela é feita em aço (não magnético para evitar campos magnéticos perturbando os átomos), e cabe num cubo de  $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ . A fim de manter o dispositivo compacto e alcançar pressões extremamente baixas, ela é compartilhada em duas câmaras de vácuo (15) e (19). Cada câmara é bombeada por um conjunto de bombas de vácuo turbo (11), iônicas e de getter (12). O vácuo da câmara (15) é mantido numa faixa de  $10^{-8}$  a  $10^{-9}$  mbar (ultrahigh vacuum, UHV). O vácuo da câmara (19) é mantido abaixo de  $10^{-11}$  mbar (extreme ultrahigh vacuum, XUHV) [29] sendo medido por um medidor de pressão (13).

[39] Um desafio maior é garantir o acesso óptico necessário para permitir a inserção de todos os feixes dentro da câmara de vácuo principal (19). Estes são os seis feixes da AMO (armadilha magneto-óptica) azul, os seis feixes da AMO vermelha, o laser de rebombeamento, os dois feixes da rede óptica, o acesso óptico para tirar fotos da nuvem, o feixe atômico e o acesso óptico para recolher a luz transmitida por cada um dos espelhos da cavidade anular (três vezes duas direções). Nenhuma câmara de vácuo padrão (cubo, octógono, etc.) consegue satisfazer esta condição. Frequentemente são usadas células de vidro, mas estas não permitem acomodar um suporte para a cavidade anular. O conceito da câmara de vácuo principal (19) mostrado na figura 6 oferece um ótimo acesso óptico permitindo, ao mesmo tempo, incorporar uma fixação (24) para o suporte (25) da cavidade anular (23). A figura 5

mostra uma foto de uma realização possível. As janelas (33) são de vidro BK7. A junção entre a câmara (19) e as janelas (33) é feita de fios de índio, que é um metal suficientemente mole para garantir um calafetamento hermético.

#### Dispositivo de resfriamento

[40] É proposto que seja utilizado o elemento de estrôncio  $^{88}\text{Sr}$ , visto que o gás atômico de estrôncio é gerado por dispensores alimentados em corrente através de um feedthrough elétrico (14). Entretanto, podem ser utilizadas outras espécies, como itérbio, rubídio ou outra espécie atômica que permita o resfriamento até temperaturas abaixo do limite do recuo fotônico.

[41] Os átomos do gás serão capturados e resfriados por uma armadilha magneto-óptica em duas dimensões (AMO-2D) que consiste em um campo magnético quadripolar gerado por ímãs (16) e dois pares de feixe laser contrapropagantes (17) se cruzando em ângulo reto. Os feixes laser são sintonizados a 30 MHz abaixo da ressonância atômica forte do estrôncio  $^1S_0 - ^1P_1$  em 461 nm, que tem uma largura de linha de 32 MHz. Este dispositivo concentra átomos relativamente frios num volume localizado na área de cruzamento dos feixes.

[42] Os átomos são agora empurrados por um outro feixe laser (18) da mesma frequência e passam por uma abertura do raio de 1 mm conectando as duas câmaras. Dentro da câmara principal (19) os átomos são recapturados de novo por uma armadilha magneto-óptica padrão (AMO azul) [32] que consiste em um campo magnético quadripolar gerado por ímãs (21) e três pares de feixe laser contrapropagantes (22) se cruzando em ângulo reto. Aqui os átomos são resfriados até uma temperatura em torno de 5 mK. Para evitar o decaimento dos átomos para o estado metaestável  $^3P_2$ , é necessário irradiar um laser excitando a transição do

estrôncio em 497 nm que bombeia os átomos para o estado  $^3P_1$  que, em torno, decai para o estado fundamental.

[43] Temperaturas mais baixas ainda podem ser alcançadas utilizando uma particularidade do estrôncio, ou seja, a existência de uma transição de intercombinação  $^1S_0 - ^3P_1$  em 689 nm com uma largura de linha estreita de 7,6 kHz. Nesta transição é possível operar uma armadilha magneto-óptica (AMO vermelha), onde rotineiramente temperaturas em torno de 300 nK são atingidas. Isso é suficientemente abaixo do limite de recuo fotônico (917 nK @ 689 nm) para que a nuvem atômica se comporte como uma onda de matéria.

#### Conceito da rede óptica vertical

[44] Para criação da rede óptica vertical foram escolhidos dois feixes laser (2) de comprimento de onda  $\lambda_{lat} = 532$  nm que se cruzam sob um ângulo de  $101^\circ$ . Neste ângulo a periodicidade da rede coincide com a metade do comprimento de onda da transição de intercombinação. A cintura dos feixes deve ser maior do que a extensão da nuvem. Escolhemos  $w_{lat} = 500 \mu\text{m}$ .

#### Conceito e especificação da cavidade

[45] A cavidade anular (23) proposta é esquematizada nas figuras 1 e 8. A figura 7 mostra uma foto de uma realização possível. Ela consiste de três espelhos formando um triângulo com um ângulo reto. Os substratos dos espelhos (5,6) são cortados em forma de prismas para facilitar a passagem dos feixes de luz através deles e a fixação dos substratos na geometria predefinida do suporte (25).

[46] O suporte (25) da cavidade (23) é feito de aço de maneira a fornecer uma estrutura rígida eliminando vibrações excitadas por ruído acústico. Bordas pré-moldadas definem a localização exata dos espelhos (5,6). Um dos espelhos (x) é montado num braço, que pode ser movido levemente por

deformação elástica sob a força exercida por uma cerâmica piezo-elétrica (26). A cerâmica é alimentada em corrente através de um feedthrough de vácuo (20). Isso permite a sintonização e o controle do comprimento e da frequência de ressonância da cavidade (23).

[47] O comprimento total do caminho livre da luz dentro da cavidade é  $L = 3,8$  cm. Com isso o intervalo espectral livre fica  $\delta_{fsr} = c/L = 7,76$  GHz. Os dois espelhos (6) do braço vertical da cavidade (23) têm alta reflectividade de  $R = 99,95\%$  em 689 nm e o raio de curvatura  $\rho = 50$  mm. O terceiro espelho (5) é plano e serve como acoplador. Com uma reflectividade de  $R = 99,74\%$  ele é parcialmente reflectante de maneira a permitir a entrada de luz (4).

[48] Com essas refletividades, obtemos uma finesse de  $F = 1882$  correspondendo a uma taxa de decaimento da cavidade de  $\kappa = (2\pi) 328$  kHz. A força do acoplamento átomo-cavidade é  $g = (2\pi) 8,7$  kHz. A cintura do modo da cavidade na posição de aprisionamento dos átomos é  $w_{cav} = 70$   $\mu\text{m}$ .

#### Auto-sincronização da onda de matéria

[49] Em alguns regimes de parâmetros, caracterizados pela profundidade do potencial dipolar da rede óptica  $W_0$  e da força de acoplamento entre os modos da cavidade  $U_0$ , podemos observar um efeito de auto-sincronização [28] da onda de matéria nunca descrito anteriormente. Este efeito resulta numa purificação das oscilações de Bloch, que está visível nas simulações feitas na figura 2. O gráfico superior mostra a evolução temporal do momento médio dos átomos  $\langle p \rangle_{lab}$  no sistema inercial do laboratório com  $N=40000$  átomos. O gráfico inferior mostra a evolução do número médio de fótons  $|\alpha|^2$  dentro do modo prova da cavidade. Obviamente, cada oscilação da nuvem é acompanhada por um pico na luz emitida pela cavidade (23).

[50] Inicialmente, as oscilações são sujeitas a um ruído devido à distribuição dos átomos em várias velocidades. Depois de algumas oscilações, devido ao impacto da cavidade, as trajetórias atômicas ficam sincronizadas e o ruído desaparece. Assim, a retroação exercida pela cavidade sobre os átomos estabiliza a periodicidade do seu movimento oscilatório.

[51] Para observar o efeito de auto-sincronização da onda de matéria, precisamos que a profundidade do potencial dipolar da rede seja em torno de  $W_0 \cong 3\hbar\omega_{rec}$ , onde  $\omega_{rec} = \hbar k^2/2m = 4.8 \text{ kHz}$  é a frequência do recuo fotônico. A ressonância atômica dominante para força dipolar é aquela de 461 nm. Portanto, a profundidade do potencial dipolar é  $W_0 = \frac{3\Gamma_{461}\lambda_{461}^3}{32\pi^3 c^2} \frac{1}{\lambda_{lat}-\lambda_{461}} \frac{2P_{lat}}{\pi w_{lat}^2}$ , onde  $\lambda_{461}$  é o comprimento de onda da ressonância e  $\Gamma_{461}$  sua largura natural. Resolvendo esta equação, obtemos que para gerar este potencial os lasers da rede óptica devem ter uma potência de  $P_{lat} = 1.7 \text{ W}$ .

[52] A segunda condição para observar o efeito de auto-sincronização é uma intensidade adequada da luz (4) bombeando a cavidade. Por um lado, esta luz não deve atrapalhar o confinamento dos átomos na onda estacionária (2), por outro lado ela deve ser suficiente para permitir a detecção do movimento atômico e estabilizar este movimento. Um valor possível para a força de acoplamento entre os modos da cavidade é  $U_0 \cong 0.04\hbar\omega_{rec}$ . Calculando a força de acoplamento entre os modos da cavidade como  $U_0 = \hbar g \Omega_{bmb}/4\Delta_a$ , onde  $\Omega_{bmb}$  é a frequência de Rabi devido ao laser de bombeamento, e assumindo uma dessintonia entre o laser de bombeamento e a transição de intercombinação de  $\Delta_a = -(2\pi)2 \text{ GHz}$  precisamos fornecer uma potência para o laser de bombeamento de  $P_{bmb} = 0,1 \text{ nW}$ . No entanto, como a dessintonia pode ser escolhida arbitrariamente, a potência pode também. Para manter a força de acoplamento fixa devemos aumentar a potência quadraticamente com o aumento da dessintonia,  $P_{bmb} \propto \Delta_a^2$ .

### Esquema de laser

[53] Vários lasers são necessários para compor o gravímetro (mostrado na figura 9). Foram mencionados os lasers em 461 nm (27), 497 nm (28), 689 nm (29) e 532 nm (30). Estes lasers são comercialmente acessíveis e seu uso na manipulação do estrôncio foi mostrado em várias publicações. Do outro lado, uma atenção particular deve ser prestada para o laser (31) bombeando a cavidade (23), pois ele precisa ficar em ressonância com a cavidade com alta fidelidade. Por isso, a cavidade (23) é estabilizada sobre a frequência do feixe laser incidente por uma eletrônica (32) de travamento tipo Pound-Drever-Hall (PDH) [33], que regula a cerâmica piezoelétrica (26) localizada no suporte (25) da cavidade.

### Método de medida da aceleração gravitacional

[54] Em um segundo aspecto, a presente invenção provê um método de medida da aceleração gravitacional, que compreende as seguintes etapas:

- a) Preparar um feixe de átomos frios por meio de uma AMO-2D;
- b) Capturar este feixe atômico pela AMO azul e resfriar-lo para temperaturas em torno de 5 mK;
- c) Resfriar os átomos ainda mais por uma AMO vermelha para temperaturas em torno de 300 nK;
- d) Transferir a onda de matéria para onda estacionária de luz;
- e) Incitar os átomos a executar oscilações de Bloch devido a aceleração gravitacional;
- f) Injetar um laser bombeando um modo da cavidade anular;
- g) Medir continuamente e *ao vivo* o movimento da onda de matéria.

[55] Na primeira etapa (a), a preparação de um feixe atômico é feita por meio da montagem do dispositivo apresentado nas figuras 4 e 5. Criado pela AMO-2D dentro da câmara (15), o feixe atômico é empurrado por meio de um feixe laser (18) e injetado na câmara principal (19).

[56] Na etapa (b), os átomos do feixe são recapturados pela AMO azul e resfriados até uma temperatura em torno de 5 mK com a assistência de feixes laser em 461 nm e 497 nm.

[57] Na etapa (c), quando a armadilha é carregada com uma quantidade suficiente de átomos, os feixes laser da AMO azul são desligados e os feixes laser em 689 nm são ligados de maneira a operar uma AMO vermelha resfriando a nuvem atômica para uma temperatura em torno de 300 nK.

[58] Inicialmente, o local da AMO vermelha será um pouco deslocado do modo da cavidade (23) do dispositivo, de tal maneira que os processos de aprisionamento e resfriamento não são perturbados pela presença da cavidade. Ajustando os campos magnéticos da AMO vermelha, a nuvem de estrôncio pode agora ser movida para o interior da cavidade.

[59] Na etapa (d), são ligados dois feixes laser em 532 nm se cruzando no interior da cavidade (23) sob o ângulo  $\beta = 101^\circ$ . Tal geometria permite criar uma matriz de poços de potenciais em forma de pilha de panquecas (3), nas quais se acumulam os átomos em uma rede óptica unidimensional com a periodicidade 689 nm. É importante que o eixo da rede óptica seja alinhada ao braço vertical da cavidade (23). Uma vez que os átomos ficam aprisionados pela onda estacionária, os campos de luz e o campo magnético da AMO vermelha são desligados.

[60] Na etapa (e), quando as intensidades dos feixes criando a onda estacionária são bem ajustadas [13,28], os átomos executam oscilações de Bloch, isto é, a onda de matéria é acelerada pelo campo gravitacional  $g$  até que o momento atômico é

igual ao recuo fotônico. Neste instante os átomos espalham os fótons dos feixes e são acelerados para cima pelo recuo fotônico. De novo, a gravitação acelera os átomos (massa  $m$ ) para baixo e o processo se repete. A frequência desta oscilação de Bloch é estritamente proporcional à aceleração gravitacional,  $\nu_B = mg_L/2h$ , onde  $\lambda_L = 689 \text{ nm}$  é a periodicidade da onda estacionária e  $h$  a constante de Planck. Para o estrôncio naquela transição obtemos  $\nu_B = 745 \text{ Hz}$ .

[61] A velocidade instantânea da onda de matéria é tradicionalmente medida por imagens de absorção depois de um intervalo de expansão livre [33]. Como esta imagem é feita por irradiação de um feixe laser que aquece a nuvem pelo recuo fotônico transmitido aleatoriamente aos átomos, a medida destrói a coerência da onda de matéria. Assim, cada medida precisa da criação de uma nova amostra de onda de matéria. Como o monitoramento de uma oscilação de Bloch e a identificação inequívoco do seu período requerem muitos pontos, o procedimento tradicional é trabalhoso. E como cada nova preparação de uma amostra é sujeita a flutuações (p.ex. no número de átomos ou na temperatura) a medida inteira é sujeita a incertezas.

[62] Na etapa (f), um laser (4) é injetado na cavidade (23) bombeando o modo vertical orientado de baixo para cima. O feixe laser é sintonizado não longe da linha de intercombinação do estrôncio em  $689 \text{ nm}$ , tal que seu comprimento de onda é comensurável com a periodicidade da rede atômica. A frequência do laser é travada à frequência do modo. A luz entrando na cavidade (23) e sendo parcialmente refletida pela onda de matéria (1) alimenta o modo contrapropagante da cavidade (23) e exerce uma retroação sobre o movimento da onda de matéria. Esta luz refletida, chamada de prova (8) é parcialmente transmitida pelo espelho (5) e refletida na separatriz (7), tal que a sua dinâmica

pode ser monitorada por um detector de fótons (9) localizado no exterior da cavidade (23).

[63] O modo prova (8) contém informação sobre o movimento atômico, pois cada oscilação de Bloch dos átomos produz um pulso, como mostra a figura 2. Portanto, na etapa (g), basta observar a frequência dos pulsos para deduzir a frequência das oscilações de Bloch e a força de aceleração instantânea.

#### Observação ao vivo

[64] Assim, o método proposto permite observar *ao vivo* o movimento oscilatório de uma onda de matéria.

[65] Gravímetros convencionais, por exemplo, o descrito por F. Sorrentino, et al., [22], precisam de muitos ciclos de preparação, resfriamento, oscilações de Bloch e detecção da velocidade instantânea para mapear as oscilações de Bloch. Por isso, o ciclo deve ser repetido muitas vezes, só para mapear uma única oscilação. Além de introduzir incertezas experimentais, essa repetição aumenta consideravelmente o tempo de resposta, isto é, o tempo necessário para fazer uma medida.

[66] Em contraste, o funcionamento do gravímetro proposto é caracterizado pelo fato que ele só precisa de um ciclo, pois uma vez que os átomos executam oscilações de Bloch, elas podem ser monitoradas de maneira contínua, de forma diferente dos gravímetros conhecidos.

[67] Para o nosso gravímetro, sendo limitado somente pela frequência das oscilações de Bloch de  $\nu_B = 745$  Hz, esperamos tempos de resposta em torno de alguns milissegundos. Essa resposta rápida pode ser útil para medidas de variações temporais de fatores influenciando o campo gravitacional. Um exemplo é o deslocamento de massas pesados como aquelas de caminhões passando numa autoestrada. Localizado abaixo da estrada o

gravímetro seria suficientemente rápido para permitir uma leitura da massa do caminhão.

[68] Embora a invenção tenha sido amplamente descrita, é óbvio para aqueles versados na técnica que várias alterações e modificações podem ser feitas visando aprimoramento do projeto sem que as referidas alterações não estejam cobertas pelo escopo da invenção.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. Peters, K.Y. Chung, S. Chu, *Nature* **400**, 849 (1999).
- [2] Zhou Lin, et al., *Chin. Phys. Lett.* **28**, 013701 (2011).
- [3] A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu, *Metrologia* **38**, 25 (2001)
- [4] A. Bresson, Y. Bidel, P. Bouyer, B. Leone, E. Murphy, P. Silvestrin, *Appl. Phys. B* **84**, 545 (2006).
- [5] J. Park, et al., *Science* **308**, 1139 (2005).
- [6] M. Kasevich and S. Chu, *Appl. Phys. B* **54**, 321 (1992).
- [7] H. Müller, S.w. Chiow, S. Herrmann, S. Chu, K.-Y. Chung, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 031101 (2008).
- [8] M.J. Snadden, J.M. McGuirk, P.Bouyer, K.G. Haritos, et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 971 (1998).
- [9] J.M. McGuirk, G.T. Foster, J.B. Fixler, M.J. Snadden, et al., *Phys. Rev. A* **65**, 033608 (2002).
- [10] T.L. Gustavson, P. Bouyer, M. Kasevich, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2046 (1997).
- [11] T.L. Gustavson, A. Landragin, M. Kasevich, *Class. Quantum Grav.* **17**, 2385 (2000).
- [12] G.M. Tino, et al., *Nucl. Phys. B, Proc. Suppl.* **166**, 159 (2007).

- [13] M. Ben Dahan, E. Peik, J. Reichel, Y. Castin, C. Salomon, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4508 (1996).
- [14] M. Greiner, I. Bloch, O. Mandel, T.W. Hänsch, T. Esslinger, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 160405 (2001).
- [15] O. Morsch, J.H.Müller, M. Cristiani, D. Ciampini, et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 140402 (2001).
- [16] S.R. Wilkinson, C.F. Bharucha, K.W. Madison, Qian Niu, et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4512 (1996).
- [17] B.P. Anderson and M.A. Kasevich, *Science* **282**, 1686 (1998).
- [18] G. Ferrari, N. Poli, F. Sorrentino, G.M. Tino, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 060402 (2006).
- [19] N. Poli, F.-Y. Wang, M.G. Tarallo, A. Alberti, et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 038501 (2011).
- [20] F. Sorrentino, et al., *Phys. Rev. A* **79**, 013409 (2009).
- [21] P. Cladé, S. Guellati-Khélifa, C. Schwob, F. Nez, L. Julien, et al., *Europhys. Lett.* **71**, 730 (2005).
- [22] F. Sorrentino, et al., *Microgravity Sci. Technol.* **22**, 551 (2010).
- [23] D. Kruse, Ch. von Cube, C. Zimmermann, Ph.W. Courteille, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 183601 (2003).
- [24] A.T. Black, H.W. Chan, V. Vuletic, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 203001 (2003).
- [25] Th. Elsässer, B. Nagorny, A. Hemmerich, *Phys. Rev. A* **69**, 033403 (2003).
- [26] B. Prasanna Venkatesh, M. Trupke, E.A. Hinds, D.H.J. O'Dell, *Phys. Rev. A* **80**, 063834 (2009).

- [27] B.M. Peden, D. Meiser, M.L.O. Chiofalo, M.J. Holland, *Phys. Rev. A* **80**, 043803 (2009).
- [28] M. Samoylova, N. Piovella, D. Hunter, G.R.M. Robb, R. Bachelard, Ph.W. Courteille, *Laser Phys. Lett.* **11**, 126005 (2014).
- [29] <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2011/papers/tups011.pdf>.
- [30] <http://etheses.bham.ac.uk/4635/1/Kock13PhD1.pdf>.
- [31] Xinye Xu, Th.H. Loftus, J.L. Hall, A. Gallagher, Jun Ye, *J. Opt. Soc. Am. B* **20**, 968 (2003).
- [32] <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9904034>.
- [33] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munley, H. W. Ward, *Appl. Phys. B* **31**, 97 (1983).

## Reivindicações

1. DISPOSITIVO PARA MEDIDA DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL por interferometria atômica, caracterizado por compreender: uma câmara de vácuo (15) acomodando uma armadilha magneto-óptica (3) em duas dimensões (AMO-2D) que consiste em um campo magnético quadripolar gerado por ímãs (16) e dois pares de feixe laser contrapropagantes (17) se cruzando em ângulo reto, na qual é inserida uma nuvem atômica (1) que é empurrada pelo feixe de laser (18) para a câmara principal (19), acomodando duas armadilhas magneto-ópticas (AMO azul) e (AMO vermelha), que consistem cada uma em um campo magnético quadripolar gerado por ímãs (21) e três pares de feixe de laser contrapropagantes (22) se cruzando em ângulo reto, com cada câmara bombeada por um conjunto de bombas de vácuo turbo (11), iônicas e de getter (12), sendo os átomos (1) recapturados pela AMO azul e resfriados e após ajustados os campos magnéticos da AMO vermelha são novamente resfriados, uma cavidade óptica anular (23) contendo três espelhos formando um triângulo com ângulo reto com dois destes espelhos de alta refletividade (6) e um de acoplamento (5) parcialmente reflectante, de forma a permitir a entrada de luz que interage com átomos (1) confinados no braço vertical da cavidade anular (23), os substratos dos espelhos (5,6) cortados em forma de prismas permitem a passagem dos feixes de luz através deles e a fixação dos substratos na geometria predefinida do suporte (25), que fornece uma estrutura rígida eliminando vibrações excitadas por ruído acústico, sendo que a luz (4) que entra na cavidade (23) encontra os átomos (1) na direção de baixo para cima, é espalhada pelos átomos (1) na direção contrapropagante e é parcialmente transmitida pelo espelho (5) de forma a permitir o monitoramento do movimento oscilatório dos átomos e coletar informações sobre a periodicidade das oscilações de Bloch.

2. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de serem utilizadas espécies atômicas que permitam o resfriamento até temperaturas abaixo do limite do recuo fotônico.

3. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 e 2 caracterizado pelo fato de serem as espécies atômicas: estrôncio, itérbio, rubídio, entre outras.

4. DISPOSITIVO de acordo com a reivindicação 3 caracterizado por ser a espécie atômica preferencialmente o estrôncio ( $^{88}\text{Sr}$ ).

5. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de os átomos (1) e a cavidade (23) serem preparados juntamente na câmara de vácuo (19).

6. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de a cavidade (23) óptica ser construída em torno da nuvem atômica (1) de forma que um dos braços da cavidade (23) seja alinhado à onda estacionária vertical (3).

7. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de o vácuo da câmara (15) ser mantido numa faixa de  $10^{-8}$  a  $10^{-9}$  mbar e o da câmara (19) mantido abaixo de  $10^{-11}$  mbar.

8. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de a câmara (19) incorporar uma fixação (24) para o suporte (25) da cavidade anular (23).

9. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de a junção entre a câmara (19) e as janelas (33) ser feita de fios de índio.

10. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pela localização exata dos espelhos (5) e (6) ser definida por bordas pré-moldadas.

11. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de um dos espelhos (6) da cavidade (23) ser montado num braço, que pode ser movido levemente por deformação elástica sob a força exercida por uma cerâmica piezo-

elétrica (26) que é alimentada em corrente através de um feedthrough de vácuo (20).

12. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de serem utilizados lasers nos comprimentos de 461 nm (27), 497 nm (28), 689 nm (29) e 532 nm (30).

13. DISPOSITIVO, de acordo com a reivindicação 1 caracterizado pelo fato de a cavidade (23) ser estabilizada sobre a frequência do feixe laser incidente por uma eletrônica (32) de travamento tipo Pound-Drever-Hall que regula a cerâmica piezoelétrica (26) localizada no suporte (25) da cavidade.

14. MÉTODO PARA MEDIDA DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL caracterizado por compreender as seguintes etapas:

- a) Preparar um feixe de átomos frios por meio de uma AMO-2D;
- b) Capturar este feixe atômico por uma AMO azul com temperatura em torno de 5 mK;
- c) Resfriar os átomos por uma AMO vermelha para temperaturas em torno de 300 nK;
- d) Transferir a onda de matéria para onda estacionária de luz;
- e) Incitar os átomos de executar oscilações de Bloch;
- f) Injetar um laser bombeando um modo da cavidade anular;
- g) Medir continuamente e in situ o movimento da onda de matéria.

15. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa a) ser preparada uma armadilha magneto-óptica 2D (AMO-2D) dentro da câmara (15), sendo o feixe atômico empurrado por meio de um feixe laser (18) e injetado na câmara principal (19).

16. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa b) os átomos do feixe serem

recapturados por uma armadilha magneto-óptica operada numa transição atômica larga (AMO azul) e resfriados até uma temperatura em torno de 5 mK com a assistência de feixes laser em 461 nm e 497 nm.

17. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa (c), a armadilha ser carregada com uma quantidade suficiente de átomos e os feixes laser da AMO azul são desligados e os feixes laser em 689 nm são ligados de maneira a operar uma armadilha magneto-óptica operada numa transição atômica fina (AMO vermelha) resfriando a nuvem atômica para uma temperatura em torno de 300 nK.

18. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa (d), serem ligados dois feixes laser em 532 nm se cruzando no interior da cavidade (23) sob o ângulo  $\beta = 101^\circ$  de forma a criar uma matriz de poços de potenciais em forma de pilha de panquecas (3), nas quais se acumulam os átomos em uma rede óptica unidimensional com a periodicidade 689 nm, sendo o eixo da rede óptica alinhado ao braço vertical da cavidade (23).

19. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa e) os átomos executarem oscilações de Bloch, sendo a onda de matéria acelerada pelo campo gravitacional  $g$  até que o momento atômico seja igual ao recuo fotônico, onde os átomos espalham os fótons dos feixes e são acelerados para cima pelo recuo fotônico.

20. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa f) ser injetado um laser (4) na cavidade (23) bombeando o modo vertical orientado de baixo para cima, no qual a luz entrando na cavidade (23) é parcialmente refletida pela onda de matéria (1) alimentando o modo contrapropagante da cavidade (23), gerando a prova (8) e exercendo uma retroação sobre o movimento da onda de matéria, a qual é parcialmente transmitida pelo espelho (5) e refletida na separatriz (7).

21. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por ser o feixe de laser sintonizado próximo da linha de intercombinação do estrôncio em 689 nm, tal que seu comprimento de onda seja comensurável com a periodicidade da rede atômica.

22. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado pela prova (8) ter sua dinâmica monitorada por um detector de fótons (9) localizado no exterior da cavidade (23).

23. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado por na etapa g) pelo fato de a prova (8) conter informação sobre o movimento atômico e permitir deduzir a frequência das oscilações de Bloch e a força de aceleração instantânea.

24. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado pelo fato de o método permitir observar ao vivo o movimento oscilatório de uma onda de matéria.

25. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 14 caracterizado pelo fato de o método permitir obter uma retroação exercida pela cavidade (23) sobre os átomos (1) e estabilizar a periodicidade do seu movimento oscilatório.

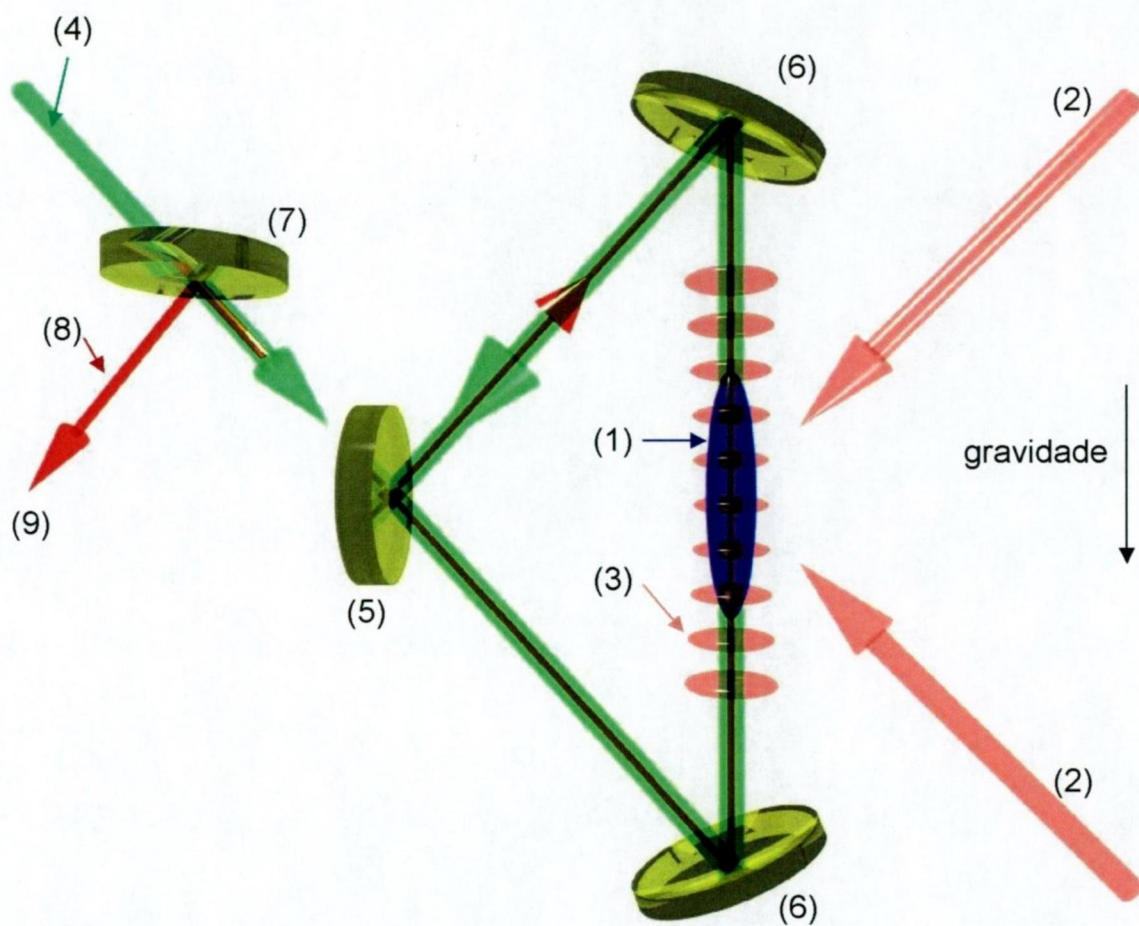


Figura 1

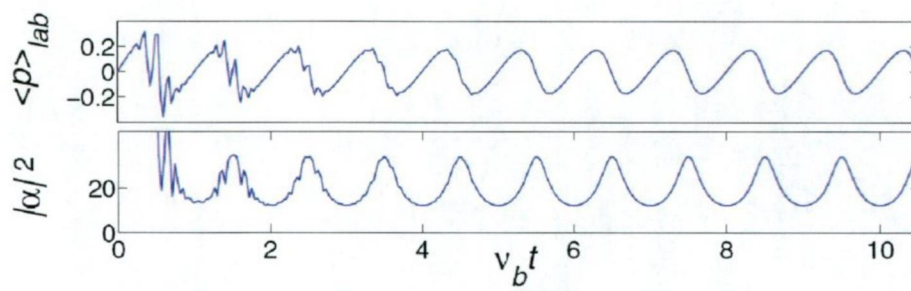


Figura 2

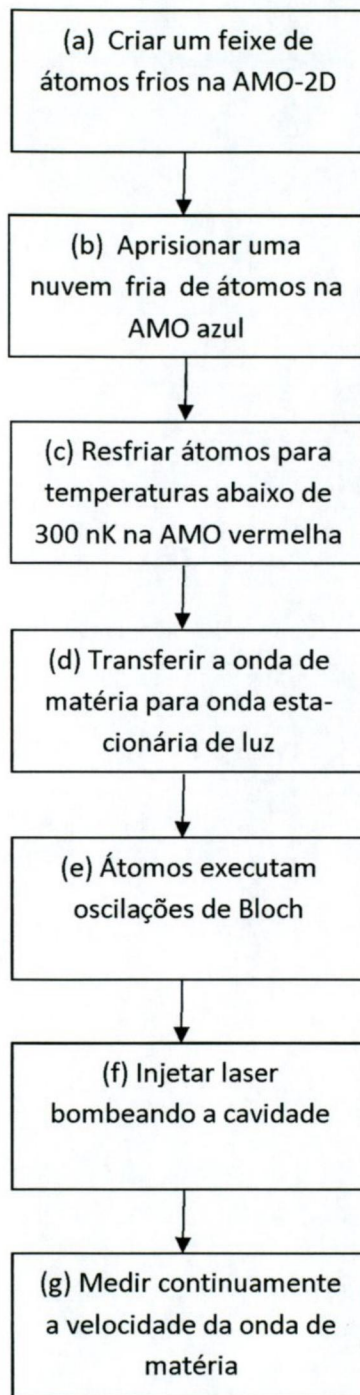


Figura 3

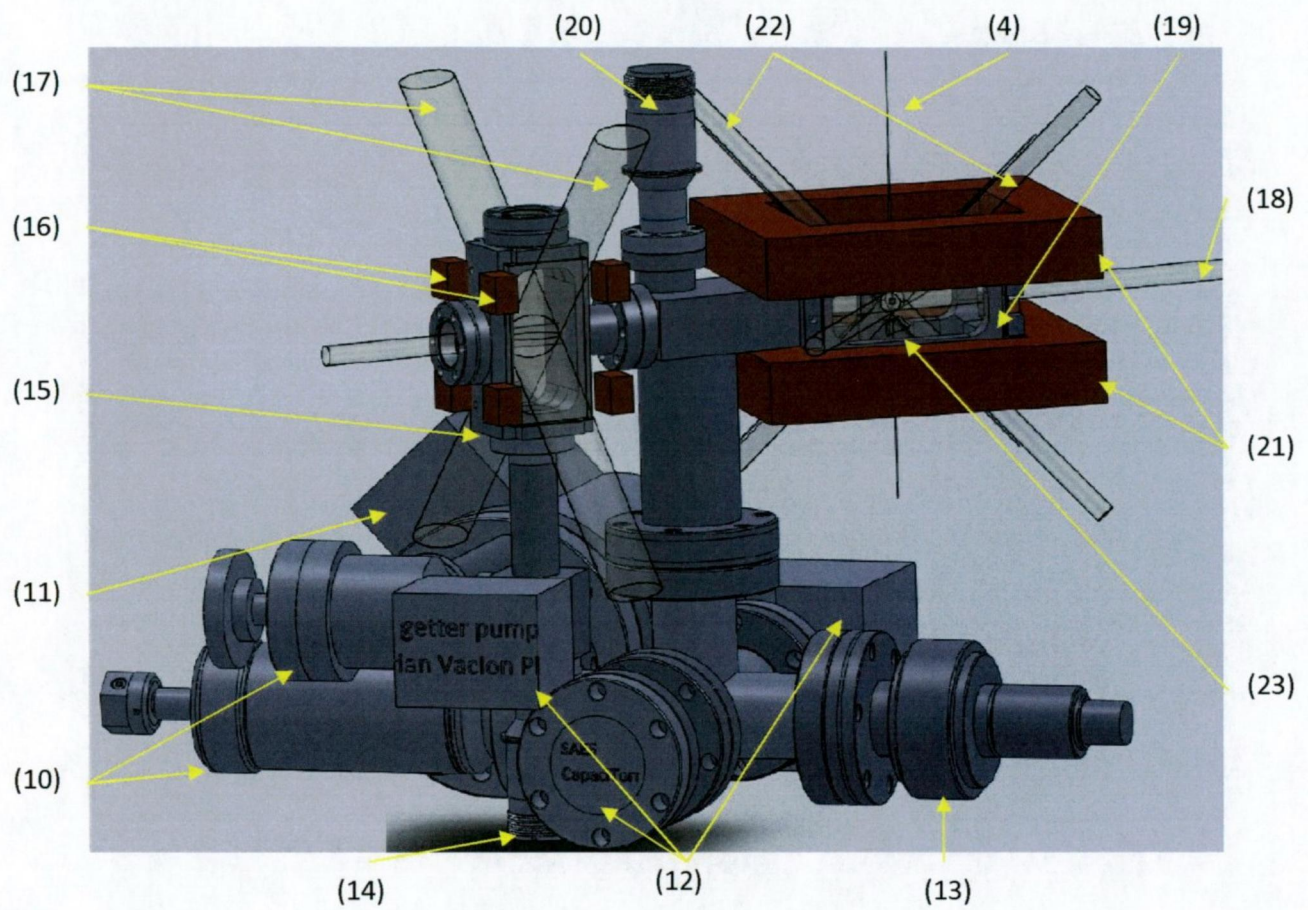


Figura 4

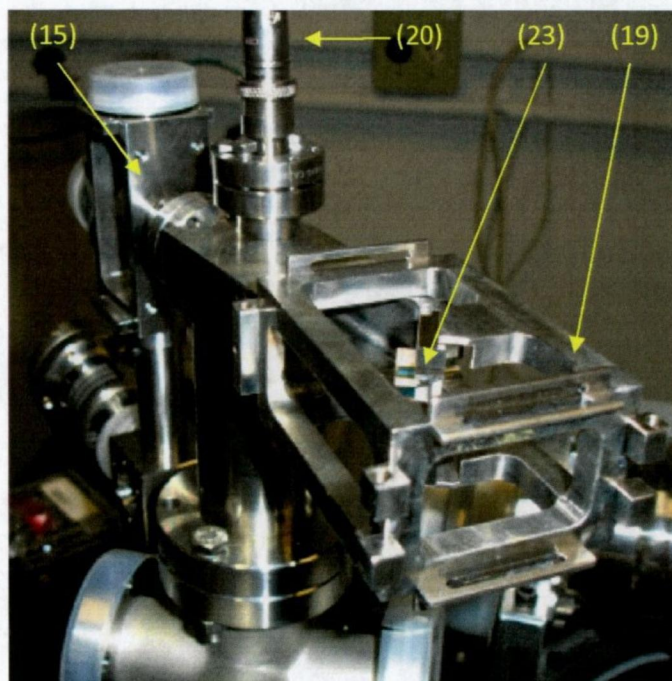


Figura 5

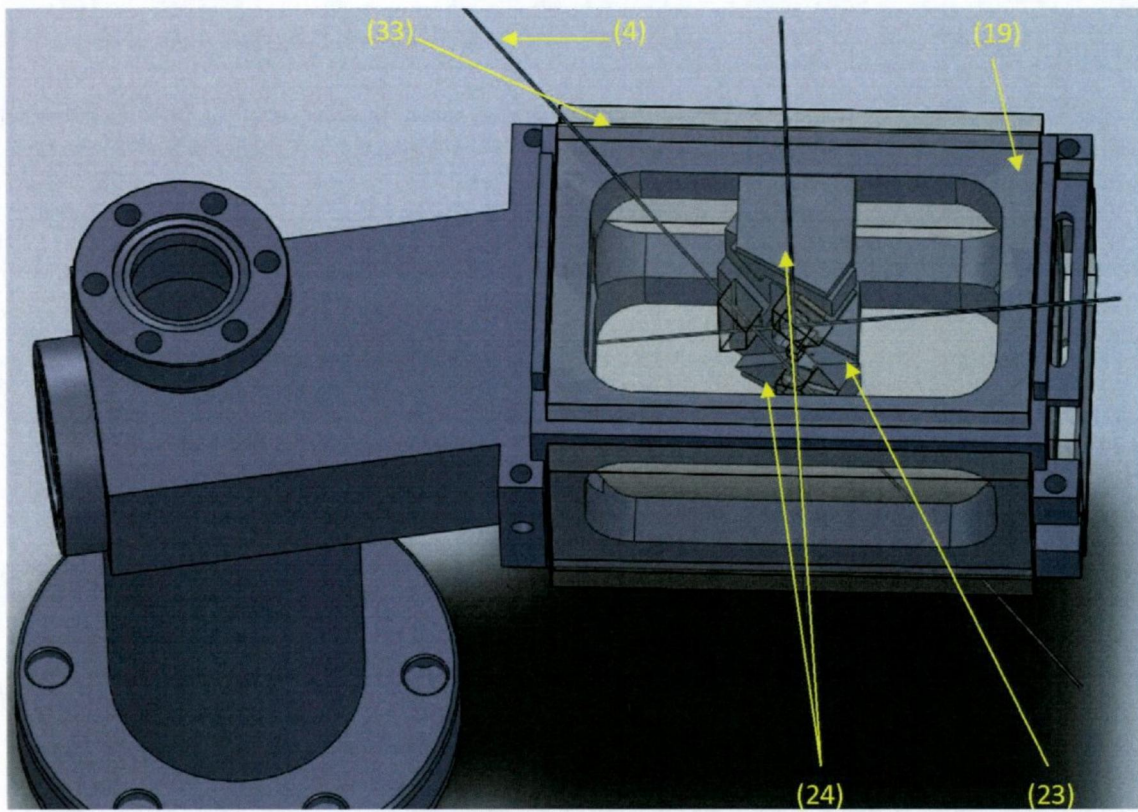


Figura 6

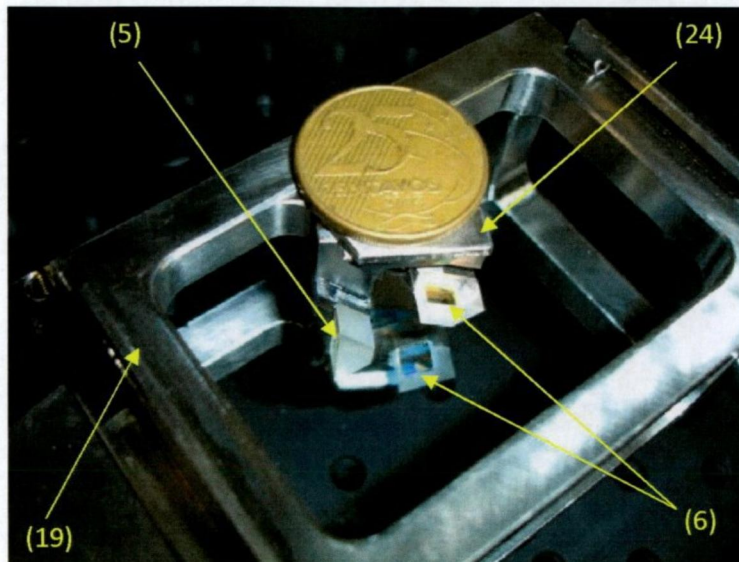


Figura 7

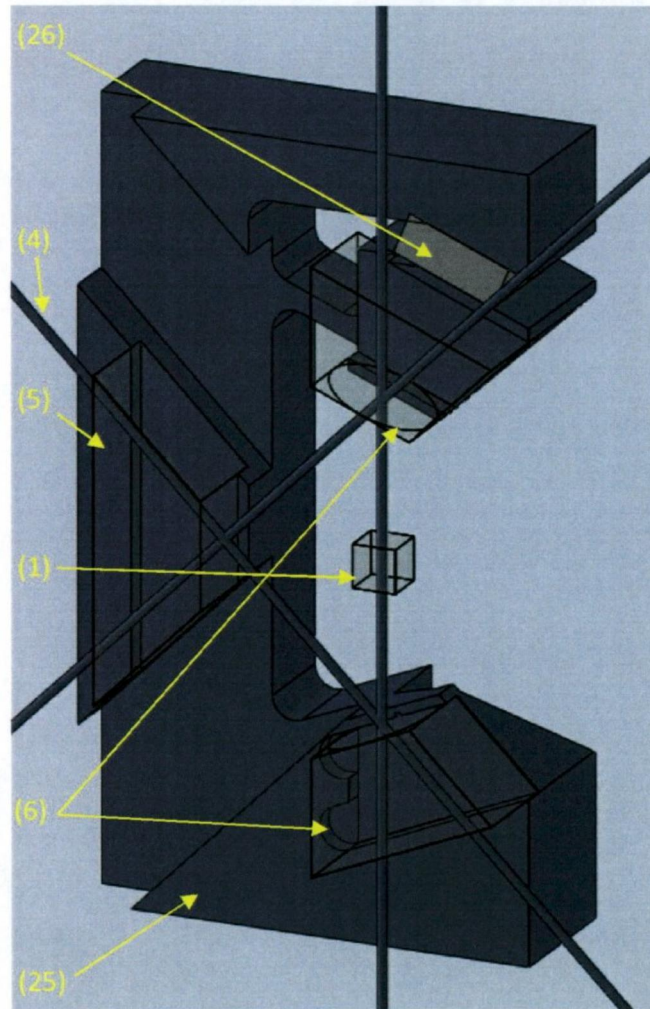


Figura 8

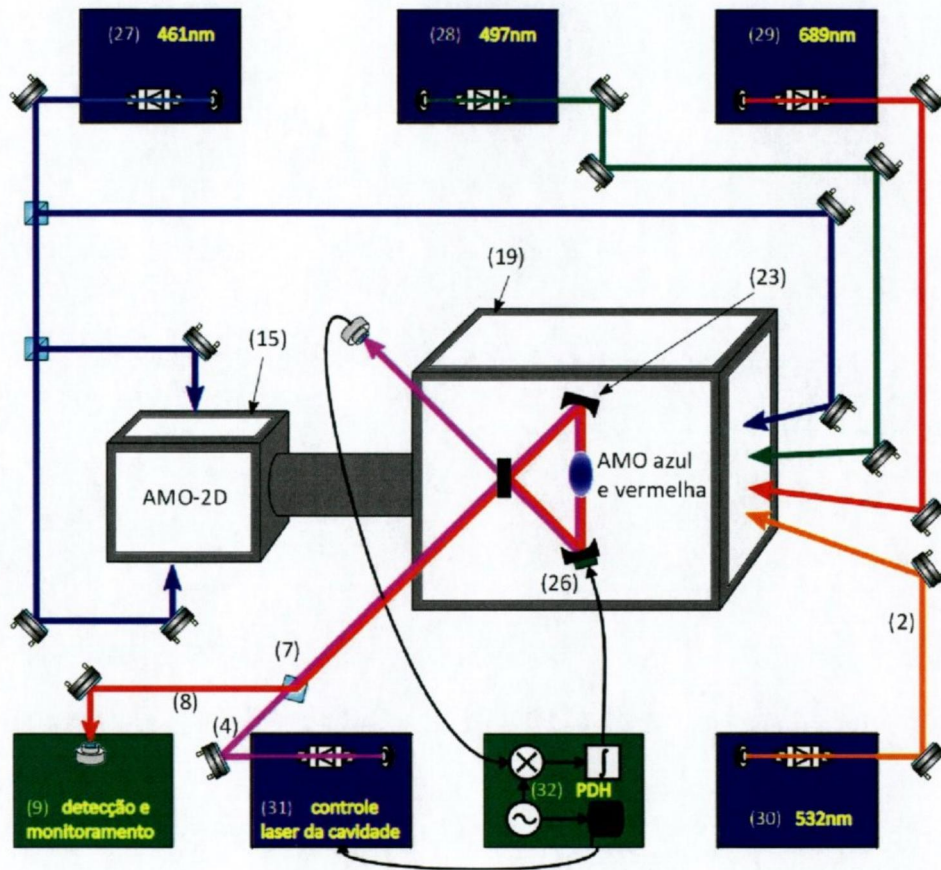


Figura 9

## RESUMO

**“DISPOSITIVO E MÉTODO PARA MEDIDA DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL”**

A presente invenção refere-se a dispositivo e método, em especial a um gravímetro baseado em interferometria atômica, no qual os átomos são resfriados até uma temperatura em que formam uma onda de matéria coerente e depois são transferidos dentro de uma onda estacionária vertical de luz quase-ressonante com uma transição atômica. Os átomos são colocados dentro de uma cavidade óptica anular (23) bombeada em uma direção por um feixe laser (18) e executam oscilações de Bloch, cuja frequência é estritamente proporcional à aceleração gravitacional. O método compreende as etapas de: a) Preparar um feixe de átomos frios; b) Capturar este feixe atômico por uma armadilha magneto-óptica operada numa transição atômica larga e resfriá-lo para temperaturas em torno de 5 mK; c) Resfriar os átomos ainda mais por uma armadilha magneto-óptica operada numa transição atômica fina para temperaturas em torno de 300 nK; d) Transferir a onda de matéria para onda estacionária de luz; e) Incitar os átomos a executar oscilações de Bloch devido à aceleração gravitacional; f) Injetar um laser bombeando um modo da cavidade anular e g) Medir continuamente e *ao vivo* o movimento da onda de matéria. O dispositivo e método propostos também levam à estabilização da periodicidade do seu movimento. O monitoramento contínuo e a estabilização das oscilações de Bloch levam ao aumento da precisão da medida.