UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física

PROJETO DE PESQUISA

Magnetometria atômica baseada na espectroscopia de sistemas atômicos coerentemente preparados.

COORDENADOR:

Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi

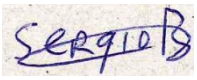
Fevereiro de 2022

Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA
Rua Cento e Sessenta e Três, 300 – Garapu
54518-430 Cabo de Santo Agostinho/PE
www.ppengfis.ufrpe.br

I- IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

1- Título	
Magnetometria atômica baseada na espectroscopia de sistemas atômicos coerentemente preparados.	
2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	03/2022
Término previsto (mês/ano):	02/2027
3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	Ciências exatas e da terra
Número do código:	1.00.00.00-3
Nome da sub-área :	Física
Número do código:	1.05.00.00-6
Nome da especialidade:	Física da Matéria condensada
Número do código:	1.05.07.00-0
4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
☐	Materiais Nanoestruturados
☐	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
☒	Metrologia e Instrumentação
☒	Espectroscopia coerente e óptica não linear
☐	Controle e dinâmica não linear
5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Magnetometria atômica	• Sistema de dois níveis degenerados
• Transparência eletromagneticamente induzida	• Estabilização em frequência
• Efeitos coerentes	

Cabo de Santo Agostinho, 10 de fevereiro de 2022



Coordenador: Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi
(SIAPE: [2279292])

6- Participantes docentes:

Nome:	Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi
CPF:	013.382.614-79
E-mail:	Sergio.barreiro@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☒ Colaborador ☐

Nome:	Rafael Alves de Oliveira
CPF:	060.534.824-39
E-mail:	rafael@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Weliton Soares Martins
CPF:	055.580.144-66
E-mail:	Weliton.martins@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	
CPF:	
E-mail:	
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☐

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

O presente projeto tem por objetivo fazer pesquisas teóricas e experimentais na espectroscopia de sistemas atômicos coerentemente preparados e sua utilização em magnetometria atômica. Além disso pretendemos desenvolver um protótipo de magnetômetro atômico, baseado em ressonâncias subnaturais originadas pela interação coerente de campos ópticos com uma amostra de átomos alcalinos. Esse assunto possui vasto interesse na engenharia, pois ele tem grande aplicabilidade tecnológica na metrologia. Com essa técnica é possível realizar medições muito precisas do campo magnético, as quais são importantes para as diversas áreas e temas do conhecimento, tais como: na medicina, no armazenamento de informação, na detecção de minerais e na prospecção de petróleo, entre outras. Além das aplicações tecnológicas, o tema é muito interessante para as ciências básicas, por envolver conceitos fundamentais de física associados aos processos de interação da radiação com a matéria. A compreensão desses conceitos permite conhecer os limites fundamentais na sensibilidade desses magnetômetros, que estão associados com diferentes mecanismos de relaxação da coerência atômica, influência de diferentes tipos de ruído do sistema e com efeitos não lineares.

Neste tema o grupo de pesquisa do qual formo parte tem recursos financeiros aprovados junto a FACEPE e CNPq que ajudaram no fortalecimento das atividades de pesquisa do recentemente criado Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) onde atuo com membro permanente, que tem sua sede na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Campus das Engenharias (UACSA-UFRPE. O projeto é bastante inovador, pois integra conceitos fundamentais de ciência básica com o desenvolvimento de aplicações tecnológicas. A consolidação de uma linha de pesquisa experimental em magnetometria atômica permitirá criar, em um futuro breve, um laboratório de magnetometria na UACSA-UFRPE. Desta forma, UACSA se tornará uma referência de desenvolvimento tecnológico na região e será um motor de inovação e desenvolvimento para o polo industrial de Suape.

2. Introdução

Nos últimos anos, a comunidade cientifica tem despertado grande interesse por fenômenos de espectroscopia coerente onde a interaçãoo entre um meio material e a luz é governado pela coerência

induzida entre os diferentes estados quânticos do material. Na maioria destes fenômenos o meio material (geralmente um vapor atómico) é preparado através da interação com um feixe óptico de bombeio que induz coerência atômica nele, e posteriormente é analisado por um outro feixe, chamado de sonda [1]. Entre os efeitos mais notáveis observados encontra-se a transparência eletromagneticamente induzida (EIT: *electromagnetically induced transparency*) [2], onde ocorre um cancelamento da absorção de luz pela amostra atômica, mesmo que os campos ópticos sejam ressonantes com a transição atômica. Esse efeito foi observado pela primeira vez por Booler et al, em vapor de estrôncio [3]. O fenômeno de EIT está intimamente ligado ao de aprisionamento coerente de população (CPT: *Coherent Population Trapping*), onde o sistema fica confinado numa superposição quântica de estados que está desacoplada da radiação, esse fenômeno foi observado primeiramente por Alzetta et al [4]. A maioria de experiências deste tipo foram realizadas em átomos alcalinos utilizando uma configuração de três níveis, na condição Λ, onde os dois níveis mais baixos são estados hiperfinos do nível fundamental e o estado excitado é um nível P. Do ponto de vista espectroscópico, o fenômeno de EIT corresponde á observação de ressonâncias muito estreitas cuja largura é muitas vezes menor do que a largura natural da transição. Essa largura subnatural é determinada pelo tempo de relaxamento da coerência entre os níveis fundamentais, o qual pode ser muito longo, conforme foi observado por Brandt et al. [5] e Budker at al. [6]. Foram propostas e realizadas várias aplicações destas ressonâncias coerentes: resfriamento abaixo do limite de recuo, Harris et al. [7], geração de não linearidades gigantes, Shang et al. [8], e separação isotópica, Kasapi [9]. Contudo, em certas condições, pode ocorrer que a interação coerente aumente a absorção do meio na ressonância. Esse fenômeno é denominado Absorção Eletromagneticamente Induzida (EIA: *Eletromagnetically Induced Absortion*) e foi previsto e observado pela primeira vez por Lezama et al. em 1998 [10], esse trabalho é parte do trabalho de Tese de Mestrado em Física do Coordenador deste projeto. Outro efeito coerente ´e o chamado Hanle-EIT que pode ser observado com um único Laser na presenc¸a de um campo magnético [11,12]. O aumento da absorção do meio ocorre devido à transferência espontânea de coerência dos estados excitados para os fundamentais Taichenachev et al. [13]. As ressonâncias subnaturais são também de interesse espectroscópico e metrológico. Em particular, a sua posição em frequência depende, por meio do efeito Zeeman, do campo magnético presente. Essas posições podem então ser usadas para uma medição precisa de campos magnéticos [14,15]. Finalmente, podemos mencionar que a rápida variação (em frequência) da absorção é acompanhada necessariamente por variações igualmente rápidas no índice de refração. Isto tem sido utilizado para fazer um meio altamente dispersivo, onde um pulso de luz se propaga com a velocidade de grupo extremamente lenta (da ordem de m/s) Hau et al. [16].

O coordenador do projeto tem vários trabalhos que mostram a conveniência de usar sistemas de dois

níveis com degenerescência na produção e estudo de fenômenos coerentes [10, 17,18]. Este sistema é, em princípio, muito mais rico que o sistema de três níveis na configuração Λ, porque coloca em jogo a degenerescência angular dos estados atômicos e o caráter vetorial do campo eletromagnético. Dada a existência de sub-níveis Zeeman, o sistema de dois níveis com degenerescência inclui uma variedade de configurações possíveis, dependendo das polarizações dos campos ópticos e a presença de um campo magnético. Uma manifestação concreta dessa riqueza adicional é refletida no fenômeno da absorção induzida (EIA, electromagnetically induced absorption) que não ocorre num sistema de três níveis.

A área que estuda a medida de campos magnéticos é chamada de magnetometria e tem sido desenvolvida desde tempos muito antigos, começando com a invenção da bússola na China antiga para fins de navegação. Nas últimas décadas, os dispositivos supercondutores de interferência quântica (SQUID: *Superconducting Quantum Interference Device*) tem sido os magnetômetros mais sensíveis, com sensibilidade de aproximadamente $1fT/\sqrt{Hz}$. A medição do campo magnético encontra aplicação em uma ampla variedade de áreas, incluindo medicina, armazenamento de informação, detecção de minerais, métodos de prospecção de petróleo, detecção de contrabando, etc. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de magnetômetros atômicos permitiu ultrapassar os SQUIDs como os dispositivos mais sensíveis para medir campos magnéticos. Em 1957 Dehmelt propôs inicialmente a observação da precessão de spins em átomos alcalinos para determinar a magnitude de um campo magnético [19] e em

1961 Bell e Bloom forneceram a primeira demonstração experimental [20]. Ao longo das próximas décadas, muito esforço foi gasto na melhoria da exatidão e precisão de magnetômetros atômicos, que têm a vantagem sobre os SQUIDs de não requerer criogenia para operar. Nos últimos anos os magnetômetros de radio frequência (RF) e os magnetômetros livres de relaxamento por troca de spin (SERF) foram introduzidos com sensibilidade demonstrada abaixo de $1fT/\sqrt{Hz}$ e capacidade para, eventualmente, detectar campos com níveis de attotesla.

Uma análise abrangente do estado atual da tecnologia magnetômetros atômicos é apresentado por Budker e Romalis Budker [21]. O princípio básico da magnetometria atômica é polarizar uma amostra de átomos alcalinos por bombeamento óptico, usando um feixe de luz circularmente polarizado que é sintonizado ressonante com uma transição atômica [22] e monitorar a sua precessão num campo magnético, usando um feixe de prova. A frequência de precessão, chamada frequência de Larmor, ω, dos spins atômicos no campo magnético B é dada por:

$$\omega = \gamma|B|$$

onde o fator giromagnético γ serve como fator de conversão entre a frequência e a intensidade do campo. Existem inúmeros métodos para monitorar a polarizaçãoo dos spins. Um deles é usar um feixe sonda polarizado linearmente que propaga ao longo de uma direção ortogonal ao feixe de bombeamento. A medida que o feixe de sonda viaja através do vapor alcalino, seu plano de polarização gira por um ângulo proporcional à componente de spin ao longo dessa direção e é detectada essa rotação, a fim de observar o comportamento dos spins. Magnetômetros são geralmente caracterizados pela sua sensibilidade que determina a precisão do dispositivo. Em um nível fundamental, o magnetômetro realmente mede a separação de energia entre os subníveis Zeeman do estado fundamental do ´atomo devido ao campo magnético. A largura de linha de uma tal medida espectroscópica é dada pelo inverso do tempo de vida T2 da coerência dos spins atômicos:

$$\Delta B = \frac{\Delta\omega}{\gamma} = \frac{1}{\gamma T_2}$$

A construção de um magnetômetro sensível depende, portanto, de atingir o máximo tempo de vida possível da polarização atômica. Os spins de átomos alcalinos se despolarizam imediatamente após a colisão com as paredes de vidro da célula de vapor, portanto, é necessário evitar essas colisões. Um método consiste em encher a célula com uma alta pressão de um gás inerte para inibir a difusão, que tem a vantagem de permitir que os átomos, em diferentes partes da célula, atuem como magnetômetros independentes, permitindo a medição de gradientes de campo magnético. O outro método consiste em revestir a superfície com um produto químico que impede a despolarização [23,24]. Parafina é o revestimento conhecido mais eficaz, permitindo que os átomos colidam até 10.000 vezes contra a superfície sem despolarização [25], por outro lado, a parafina funde a $60 - 80^{\circ}$C e assim não pode ser usado para aplicações de temperatura mais elevada. Outro revestimento que pode permitir até 2.000 colisões com a superfície e pode ser usado até $170℃$ é o octadecyltrichlorosilane (OTS) [26]

De um ponto de vista puramente fenomenológico, a sensibilidade de um magnetômetro depende da

relação sinal-ruído (S/N) do sinal de ressonância Zeeman, bem como da largura de linha,

$$\delta B = \frac{\Delta B}{(S/N)}$$

Assim, o ruído no campo magnético deve ser atenuado, e alguns cuidados devem ser tomados para assegurar que o sistema de detecção óptica seja estável. Lasers de diodo e especialmente os lasers DBR, são facilmente sintonizáveis e podem ser muito estáveis, permitindo medições com um nível de ruído extremamente baixo. Pode-se aumentar o sinal de ressonância, aumentando o número de átomos no conjunto de spins, quer por aumento da densidade do vapor ou usando uma célula maior. Isto tem a vantagem de melhorar o ”shot-noise”atômico devido a flutuações quânticas no valor esperado da

polarização do spin, $\delta\langle S\rangle \propto 1/\sqrt{N}$, que estabelece um limite fundamental sobre a sensibilidade do magnetômetro. No entanto, a taxa de despolarização por colisões entre átomos alcalinos escala com a densidade do vapor, e a alta densidade a troca de spin por colisões pode limitar o tempo de vida da polarização dos átomos. Magnetômetros sensíveis, por conseguinte, têm tradicionalmente utilizado células de vapor grandes e operado com uma densidade baixa, tipicamente a temperatura ambiente ou próximo. Apresentado pela primeira vez em 2002, o magnetômetro livre de relaxamento por troca de spin (SERF) elimina esse efeito ao operar com campo zero para permitir tempos de vida longos da polarização [27].

Nossa investigação, neste projeto, será direcionada ao estudo de alguns aspetos da magnetometria atômica, baseada na interação coerente de uma amostra de átomos alcalinos com dois campos ópticos. Nessa linha, o grupo de pesquisa, do qual o coordenador deste projeto integrava até o ano 2013, fez duas propostas experimentais de magnetômetros atômicos [28,29], porém o magnetômetro que será proposto neste projeto pretende ser mais sensível que os já construídos, sendo fundamental para o desenvolvimento tecnológico da região.

3. Objetivos

Geral:

Aprofundar o conhecimento na área de magnetometria atômica, tanto do ponto de vista teórico como experimental e estudar a espectroscopia de sistemas atômicos interagindo com dois campos ópticos, mutuamente correlacionados.

Específicos:

(1) Elaboração de um modelo teórico para permita estudar o problema de sistemas de dois níveis

degenerados acoplados com dois campos ópticos em sua generalidade e comparar com os resultados experimentais

(2) Montagem do experimento para estudar a transmissão de um feixe sonda na presença de um feixe de bombeio numa célula contendo gás de átomos alcalinos
(3) Medir o espectro do feixe sonda em presencia do feixe de bombeio
(4) Montar um experimento para medida do campo magnético usando ressonâncias coerentes
(5) Construir e testar um protótipo de magnetômetro atômico baseado no uso de ressonâncias coerentes
(6) Estudar problemas, de caráter fundamental, que limitam a sensibilidade de um magnetômetro, especificamente, os mecanismos de relaxação da coerência atômica, o mecanismo de relaxamento por troca de spin, influência do ruído do laser, conversão de ruído de fase em ruído de amplitude, ruído quântico e efeitos não lineares, como efeito Zeeman quadrático.

4. Metodologia

Para atingir os objetivos do projeto, no início estudaremos experimental e teoricamente o espectro de um feixe sonda na presenc¸a de um feixe de bombeio de frequência fixa numa amostra de átomos alcalinos, para o qual iremos montar um aparato experimental composto por uma célula contendo vapor de átomos alcalinos, na qual iremos incidir dois feixes de luz (bombeio e sonda) altamente correlacionados e com uma diferencia de frequência sintonizável. Os dois feixes correlacionados são provenientes do mesmo laser de diodo com cavidade externa, o qual está estabilizado em frequência através de uma montagem de absorção saturada. A frequência do feixe de prova é varrida em torno da frequência do feixe de bombeio com auxilio de dois moduladores acusto-ópticos. Esses feixes, adequadamente polarizados e sobrepostos, serão enviados para a amostra atômica. Após da interação dos feixes com a amostra, mediremos a transmissão do feixe de prova, através da célula, usando um fotodetector. Para medir o espectro de absorção do feixe de prova será varrida a frequência do laser e será registrada a transmissão deste feixe em função da diferença de frequência com o feixe de bombeio. Estudaremos a dependência do espectro em função da polarização dos feixes, da potência do feixe de bombeio e do campo magnético. No mesmo experimento serão estudados outros observáveis que apresentam ressonâncias espectrais subnaturais, as quais são características da resposta coerente do sistema atômico. Em primeiro lugar será estudado o comportamento do índice de refração que pode ter uma importante dispersão tanto positiva como negativa. Como consequência, a velocidade de grupo associada com esta dispersão pode mudar de sinal e até superar `a velocidade da luz. Um segundo observável a estudar é o comportamento dinâmico da fluorescência. A interação coerente de um sistema atômico com dois campos deve se manifestar na pulsação da fluorescência emitida na diferencia de frequência dos campos. Esta pulsação tem a vantagem experimental se ser facilmente detectável e conter informação espectroscópicas relativa ao campo magnético presente. Após da interação dos feixes com a amostra atômica mediremos os observáveis comentados anteriormente. Em cada caso os detectores apropriados e as técnicas de processamento de sinal pertinentes serão utilizados. Os resultados serão discutidos `a luz das predições teóricas baseadas num modelo que será desenvolvido paralelamente para tratar o problema de dois níveis com degenerescência Zeeman acoplados com dois campos ópticos em sua generalidade. Esse modelo é fundamentado no formalismo da matriz densidade.

Analisaremos a possibilidade de usar ressonâncias coerentes para a medição precisa do campo magnético. Essa possibilidade é dada, em princípio, pela dependência espectral da posição de certas ressonâncias com o campo magnético através do efeito Zeeman. Será construído um dispositivo experimental para fazer medições do campo magnético usando ressonâncias coerentes e serão estudadas suas vantagens e desvantagens com relação a outros métodos de medida do campo magnético, nesse aparato experimental usaremos três pares de bobinas perpendiculares para controlar o

campo magnético na posição dos átomos.

A continuação construiremos um novo aparato experimental para fazer medições de campo magnético usando um efeito coerente chamado Hanle onde pedem ser observadas ressonâncias sub-naturais com um único Laser na presença de um campo magnético. Uma vez criada uma anisotropia no meio atômico, usando bombeio óptico, existem várias opções para a observação da precessão atômica. Neste experimento a medição do campo magnético é realizada usando um método ressonante de detecção da evolução atômica em regime estacionário excitando o sistema atômico com um sinal da mesma frequência que a precessão de Larmor, via uma modulação do campo óptico.

Na ultima parte do projeto construiremos um protótipo de magnetômetro para medir o campo magnético em condições de campo usando um laser tipo VCSEL. Em paralelo com este objetivo prático se requer a abordagem de vários problemas de carácter fundamental. Mecanismos de relaxação da coerência atômica, limitações fundamentais na qualidade do sinal (influência do ruído do laser, a conversão de ruído de fase em ruido de amplitude, ruído quântico); modelagem teórica da evolução atômica; efeitos não-lineares (Por exemplo o efeito Zeeman quadrático); estudo do mecanismo Relaxamento por troca de spin.

Na parte inicial do projeto será necessário projetar e construir um laser de cavidade externa que garantisse uma boa estabilidade em frequência, essa cavidade será construída de forma monolítica para diminuir ao máximo as partes moveis responsáveis pelas flutuações acústicas. Mas a frequência do laser não depende unicamente da estabilidade mecânica da cavidade, também depende fortemente da corrente e da temperatura. Então, será necessário desenvolver uma fonte de corrente com uma estabilidade de 10^{-5} e um controlador de temperatura que garanta a estabilidade da cavidade com uma precisão de $0{,}1°\mathrm{C}$. Também será desenvolvido um circuito para estabilizar a frequência do laser numa transição atômica.

5. Resultados esperados

Conforme explicitado nos objetivos e na metodologia, do ponto de vista básico, esperamos que este projeto contribua para a compreensão dos fenômenos coerentes em átomos que interagem com dois campos ópticos mutuamente correlacionados. Esperamos ilustrar a riqueza física dos sistemas de dois níveis com degenerescência para estudar estes fenômenos. Com esse objetivo será proposto um modelo suficientemente geral.

Estudaremos as ressonâncias espectrais características da resposta coerente deste sistema, analisando como elas dependem da polarização e da potência dos campos, assim como do campo magnético. Analisaremos também a possibilidade de usar estas ressonâncias coerentes para a medição precisa do campo magnético que é dada, em princípio, pela dependência espectral da posição de certas ressonâncias com o campo magnético através do efeito Zeeman.

Na magnetometria atômica esperamos que este projeto contribua para aprofundar o conhecimento na área, tanto desde o ponto de vista teórico como experimental. Será construído um dispositivo para medir o campo magnético e serão estudadas suas vantagens e desvantagens com relação a outros métodos de medida. Será construído e caracterizado um protótipo de magnetômetro atômico, baseado em ressonâncias coerentes. Avançaremos na compreensão dos limites fundamentais na sensibilidade desses magnetômetros que estão associados com diferentes mecanismos de relaxação da coerência atômica, influência de diferentes tipos de ruído e com efeitos não lineares.

Com isso, surge a possibilidade de produzir conhecimento científico original e consequentemente a publicação em periódicos de alto impacto. No decorrer do projeto, estudantes de graduação e pós-graduação terão a oportunidade de participar em áreas de pesquisa de alto nível, isso implicará num

aumento da qualificação dos recursos humanos na região, beneficiando indiretamente as empresas que tem processos tecnológicos de alta complexidade na região do Suape, onde nossa instituição está inserida. Isso também vai contribuir para a formação de recursos humanos, de altíssima qualidade na área tecnológica para o estado, possibilitando a chegada de empreendimentos industriais de grande porte e de maior valor agregado.

6. Cronograma de atividades

Semestre / Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I										
II										
III										
IV										
V										
VI										
VII										

Atividade I	Projetar e construir um laser de cavidade externa e instrumentação eletrônica necessária para a estabilização em frequência desse laser
Atividade II	Montagem do experimento para estudar o espectro de transmissão de um feixe sonda na presença de um feixe de bombeio numa célula contendo gás de átomos alcalinos
Atividade III	Elaboração de um modelo teórico que permita estudar o problema de sistemas de dois níveis degenerados acoplados com dois campos ópticos em sua generalidade e comparar com os resultados experimentais
Atividade IV	Realização de medidas sistemáticas da largura de linha e posição das ressonâncias no espectro do feixe sonda em presencia do feixe de bombeio, em função do campo magnético, da potência do feixe de bombeio e das polarizações dos feixes. As medidas serão feitas em transições com EIT e com EIA
Atividade V	Montar um experimento para medida do campo magnético dentro de uma blindagem magnética usando ressonâncias Hanle, com um único feixe e produzindo uma modulação no laser para produzir bandas laterais
Atividade VI	Construir e testar um protótipo de magnetômetro para que funcione fora de uma mesa óptica, usando lasers VCSEL, realizando com ele medidas do campo magnético terrestre fora do laboratório
Atividade VII	Estudar varios problemas de caráter fundamental que afetam a sensibilidade dos magnetômetros atômicos como mecanismos de relaxação da coerência atômica, influência de diferentes tipos de ruído e efeitos não lineares

7. Apoio financeiro e/ou institucional

Os colaboradores deste projeto coordenam projetos com recursos aprovados em editais de CNPq e FACEPE, os quais vão a contribuir com infraestrutura de laboratório que será usada também pelo presente projeto no laboratório de Óptica Quântica e Espectroscopia Coerente de UACSA-UFRPE. Além disso, o coordenador deste projeto pretende submeter novas propostas para financiamento de projetos nas agências de fomento estaduais e federais

8. Referências

(1) Arimondo, E. 1996. Coherent population trapping. Progress in optics xxxv, 257.

(2) Fleischhauer, Michael, Imamoglu, Atac, & Marangos, Jonathan P. 2005. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media. Reviews of modern physics, 77(2), 633.

(3) Boller, K-J, Imamoglu, A, & Harris, Stephen E. 1991. Observation of electromagnetically induced transparency. Physical review letters, 66(20), 2593.

(4) Alzetta, GAML, Gozzini, A, Moi, L, & Orriols, G. 1976. An experimental method for the observation of rf transitions and laser beat resonances in oriented na vapour. Il nuovo cimento b (1971-1996), 36(1), 5–20.

(5) Brandt, S, Nagel, A, Wynands, R, & Meschede, D. 1997. Buffer-gas-induced linewidth reduction of coherent dark resonances to below 50 hz. Physical review a, 56(2), R1063.

(6) Budker, D, Kimball, DF, Rochester, SM, & Yashchuk, VV. 1999. Nonlinear magneto-optics and reduced group velocity of light in atomic vapor with slow ground state relaxation. Physical review letters, 83(9), 1767.

(7) Harris, SE, Field, JE, & Imamo˘ glu, A. 1990. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency. Physical review letters, 64(10), 1107.

(8) Shang, SQ, Sheehy, B, Metcalf, H, Van der Straten, P, & Nienhuis, G. 1991. Velocity-selective resonances and sub-doppler laser cooling. Physical review letters, 67(9), 1094.

(9) Kasapi, A. 1996. Enhanced isotope discrimination using electromagnetically induced transparency. Physical review letters, 77(6), 1035.

(10) Akulshin, AM, Barreiro, S, & Lezama, A. 1998. Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in rb vapor. Physical review a, 57(4), 2996.

(11) Andreeva, Ch, Cartaleva, S, Dancheva, Y, Biancalana, V, Burchianti, A, Marinelli, C, Mariotti, E, Moi, L, & Nasyrov, K. 2002. Coherent spectroscopy of degenerate two-level systems in cs. Physical review a, 66(1),012502.

(12) Renzoni, F, Cartaleva, Stefka, Alzetta, G, & Arimondo, Ennio. 2001. Enhanced absorption hanle effect in the configuration of crossed laser beam and magnetic field. Physical review a, 63(6), 065401.

(13) Taichenachev, A. V., Tumaikin, A. M., & Yudin, V. I. 1999. Electromagnetically induced absorption in a four-state system. Physical review letters, 61(1), 011802.

(14) H, Lee, M, Fleischhauer, & MO, Scully. 1998. Sensitive detection of magnetic fields including their orientation with a magnetometer based on atomic phase coherence. Physical review a, 58(3), 2587.

(15) Scully, Marlan O, & Fleischhauer, Michael. 1992. High-sensitivity magnetometer based on index-enhanced media. Physical review letters, 69(9), 1360.

(16) Hau, Lene Vestergaard, Harris, Stephen E, Dutton, Zachary, & Behroozi, Cyrus H. 1999. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. Nature, 397(6720), 594–598
(17) Akulshin, AM, Barreiro, S, & Lezama, A. 1999. Steep anomalous dispersion in coherently prepared rb vapor. Physical review letters, 83(21), 4277.
(18) Lezama, A, Barreiro, S, & Akulshin, AM. 1999. Electromagnetically induced absorption. Physical review a, 59(6), 4732.
(19) Dehmelt, H. G. 1957. Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms. Phys. rev., 105(Mar), 1924–1925.
(20) Bell, William E., & Bloom, Arnold L. 1961. Optically driven spin precession. Phys. rev. lett., 6(Mar), 280–281.
(21) Budker, Dmitry, & Romalis, Michael. 2007. Optical magnetometry. Nature physics, 3, 227–234.
(22) HAPPER, WILLIAM. 1972. Optical pumping. Review of modern physics, 44(Apr), 169–249.
(23) Bouchiat, M. A., & Brossel, J. 1966. Relaxation of optically pumped rb atoms on paraffin-coated walls. Physical review, 147(Jul), 41–54.
(24) Robinson, H. G., Ensberg, E. S., & Dehmelt, H. G. 1958. Preservation of spin state in free atom-inert surface collisions. Bulletin of the american physical society, 3, 9.
(25) Graf, M. T., Kimball, D. F., Rochester, S. M., Kerner, K., Wong, C., Budker, D., Alexandrov, E. B., Balabas, M. V., & Yashchuk, V. V. 2005. Relaxation of atomic polarization in paraffin-coated cesium vapor cells. Phys. rev. a, 72(Aug), 023401.
(26) Seltzer, S. J., Meares, P. J., & Romalis, M. V. 2007. Synchronous optical pumping of quantum revival beats for atomic magnetometry. Physical review a, 75(May), 051407.
(27) Allred, J. C., Lyman, R. N., Kornack, T. W., & Romalis, M. V. 2002. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation. Phys. rev. lett., 89(Sep), 130801.
(28) Lenci, L., Barreiro, S., Valente, P., Failache, H., & Lezama, A. 2012. A magnetometer suitable for measurement of the earth's field based on transient atomic response. Journal of physics b: Atomic, molecular and optical physics, 45(21), 215401.
(29) Lenci, L., Auyuanet, A., Barreiro, S., Valente, P., Lezama, A., & Failache, H. 2014. Vectorial atomic magnetometer based on coherent transients of laser absorption in rb vapor. Physical review a, 89(4), 043836.