

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

**Estudo de propriedades quânticas dos feixes  
sonda e de bombeio na transparência  
induzida por laser**

Carlos Leonardo Garrido Alzar

Tese apresentada ao Instituto de Física  
da Universidade de São Paulo como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
Doutor em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alberto Nussenzweig

*Paulo Nussenzweig*

Banca examinadora:

Prof. Dr. Antonio F. R. de Toledo Piza  
Prof. Dr. Arturo Lezama  
Prof. Dr. Miled H. Y. Moussa  
Prof. Dr. Nicim Zagury

São Paulo, 15 de Março 2002

*Armando Corbani Ferraz*  
Prof. Armando Corbani Ferraz  
Presidente da Comissão de Pós Graduação

SBI-IFUSP



305M810T3646

INSTITUTO DE FÍSICA

Serviço de Biblioteca e Informação

Tombo:

3646  
ex. 1

535  
G24L  
D  
ex. 1

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação  
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Garrido Alzar, Carlos Leonardo

Estudo de Propriedades Quânticas dos Feixes Sonda e  
de Bombeio na Transparência Induzida por Laser.  
São Paulo 2002.

Tese (Doutoramento) - Universidade de São Paulo  
Instituto de Física – Departamento de Física Experimental

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alberto Nussenzveig  
Área de Concentração: Ótica Quântica

Unitermos: 1. Transparência Induzida por Laser;  
2. Flutuações Quânticas do Campo Eletromagnético;  
3. Equações de Heisenberg-Langevin;  
4. Correlações Quânticas;  
5. Efeitos Coerentes em Meios Atômicos.

USP/IF/SBI-012/2002

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Flutuações Quânticas do Campo Eletromagnético</b>	<b>5</b>
2.1	Quantização do Campo Eletromagnético . . . . .	5
2.2	Operadores de Quadratura . . . . .	12
2.2.1	Espectro de ruído dos operadores de quadratura . . . . .	14
2.2.2	Estados coerente e comprimido . . . . .	16
2.3	Medida das Propriedades Estatísticas do Campo Eletromagnético . . . . .	18
2.3.1	Detecção homodina . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Analogia Clássica da Transparência Induzida por Laser</b>	<b>23</b>
3.1	O Fenômeno da Transparência Induzida por Laser . . . . .	24
3.2	Modelo Teórico . . . . .	24
3.2.1	Analogia utilizando massas e molas . . . . .	26
3.3	Simulação Experimental da Transparência Induzida Utilizando Circuitos <i>RLC</i> . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Tratamento Teórico da Transparência Induzida por Laser</b>	<b>37</b>
4.1	Equações Quânticas de Langevin . . . . .	38
4.1.1	Hamiltoniano do sistema . . . . .	40
4.1.2	Equações quânticas de Langevin para os campos . . . . .	49
4.1.3	Equações quânticas de Langevin para as variáveis atômicas . . . . .	54
4.1.4	Equações quânticas de Langevin para o sistema átomo-campo . . . . .	61
4.2	Previsões Teóricas I: Estado Estacionário . . . . .	63
4.2.1	Equações para o estado estacionário . . . . .	63
4.2.2	Resposta do meio atômico ao feixe sonda . . . . .	67
4.3	Previsões Teóricas II: Ruído Quântico . . . . .	77
4.3.1	Equações para o estudo das flutuações . . . . .	77

4.3.2	Matriz de difusão do sistema . . . . .	81
4.3.3	Flutuações quânticas dos campos . . . . .	83
4.3.4	Correlação entre os feixes sonda e de bombeio . . . . .	92
4.3.5	Influência da frequência de análise . . . . .	105
<b>5</b>	<b>Estudo Experimental das Flutuações dos Campos na Condição de Transparência Induzida</b>	<b>111</b>
5.1	Dispositivos e Técnicas de Medição . . . . .	112
5.1.1	Lasers . . . . .	112
5.1.2	Sistema de detecção balanceada . . . . .	114
5.1.3	Meio atômico . . . . .	115
5.2	Resultados . . . . .	117
5.3	Proposta para Estudo Experimental do Caráter da Correlação Sonda-Bombeio . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Espectro de Ruído de uma Variável Estocástica</b>	<b>135</b>
<b>B</b>	<b>Equação Quântica de Langevin para um Sistema Geral</b>	<b>137</b>
<b>C</b>	<b>Cálculo das Constantes de Acoplamento</b>	<b>139</b>
<b>D</b>	<b>Cálculo da Matriz de Difusão das Variáveis Atômicas</b>	<b>145</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>147</b>

# Lista de Figuras

2.1	Distribuição espectral da intensidade de um laser. . . . .	12
2.2	Representação de um estado coerente no espaço de fase. . . . .	17
2.3	Esquema de detecção homodina. . . . .	20
3.1	Diagrama de energia para um átomo de três níveis na configuração $\Lambda$ . O nome da configuração deve-se ao fato de que ao conectar cada estado fundamental com o estado excitado, forma-se a letra grega $\Lambda$ . . . . .	25
3.2	Modelo mecânico empregado para simular a transparência induzida eletromagneticamente. . . . .	26
3.3	Dependência com a frequência da potência da força sonda absorvida pela partícula que simula o átomo. Os valores de $\Omega_r$ são (a) 0,0 , (b) 0,1 , (c) 0,2 , (d) 0,3 , (e) 0,4 , e (f) 0,5 em unidades de frequência. . . . .	28
3.4	Respostas dispersiva (a) e absorptiva (b) da potência da força sonda transmitida à partícula 1 para $\Omega_r = 0,1$ em unidades de frequência. . . . .	29
3.5	Circuito elétrico utilizado para investigar a transparência induzida. . . . .	31
3.6	Potência transferida ao circuito ressonante $R_2L_2C_{e2}$ como função da frequência $\omega_s$ para diferentes valores do capacitor de acoplamento $C$ . Para cada curva os valores de $C$ são (a) $C = 0,196 \mu F$ , correspondente à frequência de ressonância $f_{Res} = \omega_2/2\pi = 20,0 kHz$ , (b) $C = 0,150 \mu F$ , $f_{Res} = 19,5 kHz$ , (c) $C = 0,096 \mu F$ , $f_{Res} = 21,5 kHz$ , (d) $C = 0,050 \mu F$ , $f_{Res} = 26,5 kHz$ . . . . .	34
4.1	Configuração lambda para um átomo de três níveis. . . . .	40
4.2	Esquema geral de um laser com cavidade Fabry-Pérot. A cavidade laser está formada pelos espelhos de saída $M1$ e $M2$ , este último de refletividade igual a 100 %, entre os quais está localizado o meio encarregado de gerar a radiação laser. . . . .	42

4.3	Modelo de interação para o sistema total. . . . .	44
4.4	Diagrama do processo de colisão. O átomo que interage com os lasers encontra-se inicialmente no estado $ 1, \hbar\vec{K} = 0\rangle$ e, como resultado da colisão com o átomo da espécie $X$ inicialmente no estado $ \phi_i, \hbar\vec{K}_X\rangle$ , passa ao estado $ 2, \hbar\vec{K} = 0\rangle$ . O processo físico (neste caso a colisão) é representado pelo símbolo “o”. . . . .	47
4.5	Processos físicos levados em conta na formulação do problema da transparência induzida. . . . .	48
4.6	Níveis de energia da transição $D_2$ do $^{85}\text{Rb}$ . O valor em $MHz$ indica a separação em frequência entre os diferentes níveis de momento angular total $F$ . . . . .	67
4.7	Resposta do meio atômico ao feixe sonda para um número de átomos $N = 5,0 \times 10^8$ . Para uma intensidade do sonda igual a $10,9 \mu W/cm^2$ , os valores da intensidade do bombeio em $\mu W/cm^2$ são: (a) $4,9 \times 10^{-4}$ , (b) 4,9, (c) 30,4, (d) 486,5, (e) 1945,8. . . . .	69
4.8	A absorção do feixe sonda depende da separação em energia dos níveis vestidos $ 3+\rangle$ e $ 3-\rangle$ . O ângulo $\theta$ é definido pela taxa de Rabi e a dessintonia do feixe de bombeio. . . . .	71
4.9	Curvas de biestabilidade dos feixes sonda e de bombeio. A curva do bombeio foi obtida para uma intensidade fixa do sonda igual a $10,9 \mu W/cm^2$ ( $\alpha_2 = 15$ ). . . . .	73
4.10	Processo de colisão acompanhado por uma transferência de população como mecanismo de retroalimentação responsável pelo comportamento biestável do campo de bombeio. A flecha tracejada representa o trânsito por um estado virtual, nesse caso, o estado excitado $ 0\rangle$ . . . . .	74
4.11	Curva de biestabilidade do feixe de bombeio para $\Gamma_{1 \rightarrow 2} = \Gamma_{2 \rightarrow 1} = 1,3 \times 10^{-4} \Gamma$ . . . . .	75
4.12	Absorção do sonda para intensidades comparáveis com a intensidade de saturação $I_{SAT} = 1,6 mW/cm^2$ . Intensidade do feixe sonda $I_2 = 2,80 mW/cm^2$ ( $\alpha_2 = 240$ ), intensidade do bombeio (a) $I_1 = 3,89 \times 10^{-1} mW/cm^2$ ( $\alpha_1 = 89$ ), (b) $I_1 = 9,73 mW/cm^2$ ( $\alpha_1 = 447$ ). . . . .	76
4.13	Flutuações quânticas da quadratura da amplitude dos feixes sonda $V_{2s}(\Omega, \phi = 0)$ e de bombeio $V_{1s}(\Omega, \theta = 0)$ na condição de transparência mostrada na Fig. 4.12(a), para uma frequência de análise $\Omega = \Gamma/6 = 6,28 MHz$ . O ruído foi normalizado ao shot noise (0 dB). . . . .	86

4.14	Correlação entre as quadraturas da amplitude dos feixes sonda e de bombeio $c_{\theta=0,\phi=0}(\Omega = \Gamma/6)$ , correspondente à situação mostrada na Fig. 4.13. . . . .	88
4.15	Curva de biestabilidade do bombeio para uma intensidade fixa do sonda: $2,80 \text{ mW/cm}^2$ ( $\alpha_2 = 240$ ). Os círculos apontam os dois possíveis valores de $\alpha_1$ correspondentes a uma dada intensidade da fonte do bombeio. . . . .	89
4.16	Curva de biestabilidade do bombeio para uma intensidade maior da fonte. Intensidade do sonda: $2,80 \text{ mW/cm}^2$ ( $\alpha_2 = 240$ ). Novamente, os círculos apontam os dois possíveis valores da amplitude média do bombeio $\alpha_1$ . . . . .	90
4.17	Flutuações quânticas e correlação das quadraturas da amplitude. Intensidade do sonda: $2,80 \text{ mW/cm}^2$ , intensidade do bombeio: $9,73 \text{ mW/cm}^2$ . $\Omega = \Gamma/6$ . . . . .	91
4.18	Ruído e correlação das quadraturas da amplitude do sonda (círculo aberto) e do bombeio (quadrado aberto) versus intensidade do bombeio para uma dessintonia nula do sonda $\delta_{L2} = 0$ e frequência de análise $\Omega = \Gamma/6$ . (Linhas sólidas utilizadas para mostrar o comportamento.) . . . . .	92
4.19	Flutuações quânticas das quadraturas da amplitude e da fase dos feixes sonda e de bombeio, tomados com iguais intensidades, $I_1 = I_2 = 2,80 \text{ mW/cm}^2$ . Frequência de análise $\Omega$ igual a $\Gamma/6$ . . . . .	93
4.20	Correlação entre as quadraturas da amplitude $c_{\theta=0,\phi=0}(\Omega = \Gamma/6)$ e da fase $c_{\theta=\pi/2,\phi=\pi/2}(\Omega = \Gamma/6)$ de cada campo para a situação correspondente à Fig. 4.19. . . . .	94
4.21	Produto das variâncias inferidas do feixe sonda para uma frequência de análise $\Omega = \Gamma/6$ . A correspondente correlação entre as quadraturas é mostrada na Fig. 4.20. . . . .	99
4.22	Aplicação do critério DGCZ na determinação do caráter da correlação entre os feixes sonda e de bombeio. Frequência de análise $\Omega$ igual a $\Gamma/6$ . . . . .	103
4.23	Dependência da correlação sonda-bombeio, e das flutuações quânticas das quadraturas da amplitude e da fase do feixe de bombeio, com a frequência de análise para $\delta_{L2} = 0$ . . . . .	105
4.24	Influência da frequência de análise sobre o caráter quântico da correlação entre os feixes sonda e de bombeio. Dessintonia do sonda, $\delta_{L2} = 0$ . . . . .	106
5.1	Esquema da montagem do diodo laser na configuração Littrow.	113

5.2	Potência do laser sonda vs. corrente de alimentação. A linha sólida representa um ajuste linear dos dados experimentais (símbolos quadrados).	114
5.3	Esquema da experiência da absorção saturada. IO: isolador ótico; LV: lâmina de vidro; E: espelho; D: fotodetector; OSC.: osciloscópio.	116
5.4	Espectro de absorção saturada do $^{85}\text{Rb}$ correspondente às transições $ 5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow  5P_{3/2}, F' = 1, 2, 3\rangle$ . O fundo sobre o qual estão localizados os picos deve sua origem ao alargamento Doppler. Potência do laser: $6,3 \times 10^{-1} \text{ mW}$ .	118
5.5	Esquema da montagem experimental. DL1 e DL2: diodos laser em cavidade estendida; IO: isolador ótico; LV: lâmina de vidro; PBS: cubo divisor de feixes polarizador; $\lambda/2$ : lâmina de meia onda; E: espelho; Rb: célula com rubídio; D1 e D2: fotodetectores; "+/-": circuito misturador; A.S.: analisador de espectros.	119
5.6	Curva de transparência induzida do feixe sonda. As potências incidentes dos feixes sonda e de bombeio são, respectivamente, $6,3 \times 10^{-1} \text{ mW}$ e $9,9 \times 10^{-1} \text{ mW}$ .	120
5.7	Espectro de ruído do feixe sonda na entrada da célula com vapor de rubídio. Potência da luz: $3,0 \text{ mW}$ .	121
5.8	Espectro de ruído do feixe de bombeio na entrada da célula com vapor de rubídio para uma potência do feixe incidente igual a $3,0 \text{ mW}$ .	122
5.9	Espectros de ruído da intensidade dos feixes sonda (a) e de bombeio (b) como função da dessintonia do sonda. O ruído eletrônico (traços inferiores) é menor que o shot noise (traço cinza) em aproximadamente $10 \text{ dB}$ . Os fatores de Fano, (c) e (d), foram deduzidos a partir de (a) e (b).	123
5.10	Espectro de ruído (a) de intensidade do feixe sonda e fator de Fano (b) para um feixe de bombeio pouco intenso. Intensidade incidente do sonda: $13,3 \text{ mW/cm}^2$ ; intensidade incidente do bombeio: $4,4 \times 10^{-1} \text{ mW/cm}^2$ .	124
5.11	Fotovoltagem proporcional à intensidade do feixe sonda para valores diferentes da transmissão do filtro de densidade neutra, colocado na entrada da detecção homodina. Durante a medida, a intensidade do bombeio foi mantida constante.	125



5.12 (a) Medida do ruído da soma (em preto) e da diferença (em cinza) das intensidades dos feixes sonda e de bombeio. A diferença observada entre as curvas é uma evidência da correlação entre as intensidades dos feixes (b). Intensidade incidente do feixe sonda: $7,5 \text{ mW/cm}^2$ ; intensidade incidente do feixe de bombeio: $7,8 \text{ mW/cm}^2$ . . . . .	126
5.13 Esquema da montagem experimental para estudar as variâncias inferidas do feixe sonda. OL1( $\theta$ ) e OL2( $\phi$ ): osciladores locais para os feixes de bombeio e sonda, respectivamente; $\eta_0(\eta_{\pi/2})$ : amplificador de ganho variável para a quadratura da amplitude (fase). . . . .	128



## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

