

**Aida Bebeachibuli**

***Espectroscopia Ramsey em um chafariz  
atômico.***

São Carlos - SP

Novembro de 2007

**Aida Bebeachibuli**

***Espectroscopia Ramsey em um chafariz  
atômico.***

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto  
de Física de São Carlos - IFSC\USP - em  
física como parte dos requisitos à obtenção  
do título de Doutora em Ciências: Física  
Básica

Orientador:

Vanderlei Salvador Bagnato

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

São Carlos - SP

Novembro de 2007

“Não é no espaço que devo procurar a minha dignidade, mas na direção do meu pensamento. Não deverei tê-la mais se possuir mundos. Pela amplidão, o universo me envolve e me traga como um átomo; pelo pensamento eu compreendo o mundo.”

Blaise Pascal, Pensées

“Aos meu pais, Romeo e Marcelle, e a minha irmã, Tanja.”

Ao Prof. Vanderlei Salvador Bagnato meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos e convivência nos últimos oito anos. A única forma de retribuir é escrevendo essa tese com muito carinho.

Ao meu AMIGO e orientador por MÉRITO Dr. Daniel Varela Magalhães. A teoria do *balão* realmente funciona.

À minha banca, Dr. Claudio Lenz, Dra. Selma Junqueira, Dr. Klaus Werner Capelle e Dr. Lucio Acioli, obrigada pela paciência na leitura da tese.

Aos meus pais, Romeo e Marcelle. Não sei como demonstrar o amor que sinto por vocês. Muito obrigada pelo carinho e, principalmente, pelo apoio que vocês tem me dado.

Às minhas irmãs, Tanja e Giana, e ao meu irmão, André, só tenho uma coisa para dizer: *Amigo é coisa para se guardar, do lado esquerdo do peito*. Amo vocês.

À minha mais nova e querida amiga, Stella. Alguém como você não se conhece em qualquer esquina. Você é muito especial. Não tenho palavras para agradecer todo o apoio que você me deu.

À Juliana pela amizade e agradáveis bate-papo regados por muitos cafezinhos ao longo desses oito anos.

Aos mais novos relojoeiros: Renato e Diego. Passo a vocês a responsabilidade de dar corda nos nossos relógios.

À equipe da eletrônica, João Marcelo, Elizeu, Edson, Orlando, Matão, Pink, e aos mais novos integrantes, Denis e Leandro. Sempre dispostos a providenciar tudo para *ontem*. É claro, não me esquecerei da agradável companhia na hora do lanche.

À equipe da oficina mecânica, Seu Gilberto, Evaldo, Leandro, Carlinhos, Pereira, Gilmar, sempre prestativos e criteriosos no que fazem.

Às secretárias Isabel, Bene, Wladerez e as bibliotecárias Neusa, Maria Cristina e Betânia.

À equipe atômica, Kilvia, Cristina, Jorge, Emmanuel, Edmir e Renato.

# *Resumo*

Apresentamos os aspectos mais relevantes para se realizar um chafariz a átomos frios de  $^{133}\text{Cs}$ , para operá-lo como um padrão primário de tempo e frequência para realizar a definição do *segundo*. O objetivo principal desse trabalho foi a otimização do sistema experimental do chafariz de átomos em duas partes críticas: a região de interação e o sistema de detecção. Além disso, otimizamos as diversas fases da manipulação óptica que fazem parte do ciclo de operação de um chafariz com o intuito de aumentar a relação sinal ruído na região de detecção. Quando os átomos são lançados com uma velocidade de  $3,39\text{m s}^{-1}$ , atingem o ápice a 60 cm acima da região de captura e passam 360ms na região de voo livre. A temperatura dos átomos na região de detecção não ultrapassa  $15,5\mu\text{K}$  e a diferença de população observada através das Franjas de Ramsey, que são a assinatura característica de um padrão de frequência atômico, tem a largura a meia altura de 1,4 Hz. A largura de linha e a relação sinal ruído da franja implicam em uma estabilidade a curto prazo de  $5,18 \times 10^{-12}$ . Alguns causadores de deslocamentos de frequência como a radiação de corpo negro, o efeito Doppler de segunda ordem, o efeito gravitacional e o efeito Zeeman de segunda ordem foram avaliados.

Palavras-chave: Padrão de frequência atômico, relógio atômico, espectroscopia Ramsey, césio, Metrologia

# *Abstract*

We present some relevant aspects for the realization of a  $^{133}\text{Cs}$  fountain, intended to operate as a primary frequency standard to realize the definition of the *second*. The main goal of this work is the optimization of the experimental setup of the atomic fountain in its most critical parts: the interaction region and the detection system. Furthermore, the several phases of the optical manipulation which concern the operation cycle of an atomic fountain were also optimized. These procedures allowed us to increase the signal to noise ratio in the detection signal. When the launching velocity is about 3.39 m/s, the atoms reach the apogee about 60 cm above the capture region and spend 360 ms in the free flight zone. The atomic ensemble temperature in the detection region is about  $15.5\mu\text{K}$  and the population difference between the two fundamental level is measured through the Ramsey fringe with a linewidth of 1.4 Hz. This linewidth, allied to the obtained S/N resulted in the measured short-term stability of  $5.18 \times 10^{-12}$ . Some frequency shift as the black body radiation shift, gravitational shift, second order Doppler shift and second order Zeeman shift were measured.

Key-words: Atomic frequency standar, atomic clock, Ramsey spectroscopy, cesium, metrology

## *Lista de Tabelas*

- 1 Deslocamentos de Frequência . . . . . p. 105
- 2 Constantes Fundamentais da Física . . . . . p. 126
- 3 Parâmetros do Átomo de  $^{133}\text{Cs}$ . . . . . p. 127

# *Lista de Figuras*

- 1 Princípio de funcionamento de um padrão de frequência atômico passivo. A frequência do oscilador macroscópico,  $\nu$ , é estabilizada na frequência de ressonância através de um sistema de realimentação: o oscilador externo fornece um sinal de interrogação a um *ensemble* atômico e um sistema eletrônico coleta o sinal de resposta emitido pelo átomos e calcula um sinal de erro. Esse sinal de erro é usado para corrigir a frequência do oscilador local. O processo é repetitivo e a frequência do oscilador local é ajustada para um valor mais próximo da frequência natural atômica. . . . . p. 21
- 2 Diagrama dos níveis de energia dos átomos de  $^{133}\text{Cs}$ . A frequência relógio corresponde à transição hiperfina  $6^2S_{\frac{1}{2}}|F = 3, m_F = 0\rangle \leftrightarrow 6^2S_{\frac{1}{2}}|F = 4, m_F = 0\rangle$  do estado fundamental. Nela também estão esquematizadas as transições ópticas mais relevantes utilizadas em um chafariz atômico, como a transição utilizada no aprisionamento magnético-óptico, na detecção e no rebombeio dos átomos. . . . . p. 22
- 3 Método de Ramsey de campos separados de interrogação. O átomo interage com a primeira região de interação durante um tempo  $\tau$ , passa por uma região livre de microondas durante um intervalo de tempo  $T$  e finalmente, em  $T + \tau$  os átomos interagem novamente com o campo de microondas. Ao longo de toda a região de interrogação os átomos sentem um campo magnético estático paralelo ao campo magnético oscilatório que define seu eixo de quantização. . . . . p. 23
- 4 Franja de Ramsey típica obtida em um padrão de frequência atômico tipo chafariz para um pulso  $b = \frac{\pi}{2}$ , quando  $T = 360\text{ms}$  e  $\tau = 12\text{ms}$ . . . . . p. 26
- 5 Franja central obtida com um padrão de frequência atômico tipo chafariz. A frequência relógio é obtida através da escravização da franja central ao efetuar uma modulação em torno da frequência,  $\nu_0$ , a meia altura. . . . . p. 27



- 6 Vista geral do padrão de frequência tipo chafariz do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo. Nela vemos as quatro partes principais da sua montagem experimental: a bancada óptica, o sistema de vácuo, a sintetização de microondas e o sistema de controle. . . . . p. 35
- 7 Esquema experimental do sistema de vácuo do Chafariz Atômico. O ciclo de funcionamento é formado por etapas distintas para realizar a interrogação dos átomos de  $^{133}\text{Cs}$ . Primeiro os átomos são aprisionados utilizando-se a técnica de armadilha magneto-óptico (MOT) e melado. Em seguida, arremessados na vertical por meio da técnica de melado em movimento, fazem um vôo balístico passando duas vezes pela mesma cavidade de microondas. Desse modo, os átomos são submetidos a dois campos oscilatórios separados por uma região livre de campo oscilatório. Por fim, a nuvem atinge a zona de detecção, que verifica as populações em cada um dos níveis de energia  $6^2S_{1/2}(F = 3)$  e  $6^2S_{1/2}(F = 4)$ , estabelecendo a eficácia com que a transição foi estimulada. . . . . p. 36
- 8 Seqüência temporal do padrão de frequência tipo chafariz do CePOF. p. 43
- 9 Imagens do sistema de vácuo do chafariz atômico. Ela é constituída pela câmara de aprisionamento e pela região de vôo livre. A região de vôo livre está situada acima da câmara de aprisionamento. Nela observamos a disposição das cavidades de preparação e interrogação, a blindagem magnética e o conjunto de bobinas de compensação do campo magnético. O sistema de detecção encontra-se a 19 cm abaixo da câmara de aprisionamento. . . . . p. 45
- 10 Imagem da região de captura e da região de detecção. A região de aprisionamento contém 11 janelas e a região de detecção contém 5 janelas soldadas em tubos sobre a câmara de aprisionamento. Todas as janelas possuem cobertura anti-refletora para infra-vermelho. . . p. 46

11	Disposição das cavidades de interrogação e de preparação soldadas por brasagem ao tubo de vôo livre, formando uma única estrutura rígida do sistema de vácuo. Ao longo do tubo de vôo livre foram posicionadas três cintas térmicas para manter a uniformidade térmica do tubo e três sondas PT100 para medir a temperatura. . . . .	p. 47
12	Disposição da bobina <i>C-field</i> , da blindagem magnética e das bobinas de compensação para definir o eixo de quantização dos átomos e evitar que campos magnéticos espúrios mascarem a frequência da transição relógio. . . . .	p. 48
13	Imagem do sistema de detecção rigidamente acoplada à estrutura de vácuo. Os feixes são produzidos na parte externa da estrutura e a seguir introduzidos por meio de uma das janelas dessa região. . . . .	p. 49
14	O solenóide <i>C-field</i> e a blindagem magnética. O solenóide é espiralmente enrolado com fio de cobre em torno de um cilindro de alumínio com 3,41 voltas/cm. A blindagem magnética da Fountain é composta por dois cilindros concêntricos separados por uma distância de 5 cm. . . . .	p. 50
15	Caracterização da bobina C-field. . . . .	p. 51
16	Efeito da blindagem magnética sobre o campo magnético local. . . . .	p. 51
17	Fonte de corrente para alimentar a bobina do C-field. . . . .	p. 52
18	Diagrama de blocos da fonte de corrente. . . . .	p. 53
19	Perfil do campo magnético nas vizinhanças da blindagem magnética. . . . .	p. 54
20	Estabilidade temporal do campo magnético local nas vizinhanças da cavidade após a pré-regulagem das bobinas de compensação. . . . .	p. 54
21	(a) Esquema da disposição das cavidades no tubo da estrutura de vácuo. A cavidade tem geometria retangular com dimensões $a$ na direção $x$ e $b$ ( $a$ na direção $y$ ). A onda eletromagnética propaga-se na direção $z$ cuja dimensão $d$ é múltiplo inteiro de $\frac{\lambda}{2}$ . (b) Configuração do campo magnético dentro da cavidade para o modo $TE_{102}$ . . . . .	p. 56
22	Sintonia da frequência de ressonância da cavidade como função da temperatura. . . . .	p. 58

## 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:

