Capítulo 5

Conclusões

Tendo em vista a grande dificuldade que foi observada para encontrar uma região onde seria possível realizar o resfriamento e então ajustar os parâmetros corretamente, a simulação computacional se mostra mais uma vez uma ferramenta muito importante para os físicos experimentais, pois direciona o trabalho e ajusta uma séria de parâmetros e evita como nesse caso que muito tempo de trabalho seja empregado em uma idéia com poucas possibilidades de sucesso, o trabalho computacional serviu para o grupo do laboratório LASER do Instituto de Física da UFRJ, já partir para outras idéias e possibilidades, uma vez que o resfriamento a laser do Lítio em uma armadilha com as características da existente não se mostra viável. Variações do *software* simples de serem implementadas se mostram muito interessantes para o grupo, pois podemos ver previamente o espectro do Li que esperamos medir brevemente, apenas descartando no código implementado os processos de emissão e fazendo um histograma dos eventos de absorção em função da frequência.

Foi apresentado e construído um sistema compacto de geração de radiação laser no infravermelho, estabilizada em freqüência. Essa fonte poderá ser utilizada para estudar a transição 1S-2S do hidrogênio fazendo um duplo dobramento de frequência. Potências em torno de 100 mW para o comprimento de onda de 972 nm foi obtida mas do que o suficiente para o projeto à que esse laser se propôe, uma vez que é previsto a utilização de um amplificador ótico do qual é necessária apenas a potência de 30 mW de entrada.

A largura de linha que medimos foi de $\sigma_L = (6.3 \pm 0.9)MHz$, muito longe do que precisamos para o hidrogênio, logo o passo seguinte é a implementação de uma outra cavidade acoplada ao laser para realizar a estabilização na largura de linha

natural do hidrogênio.

A variação que conseguimos variando somente o *piezoelétrico* foi de 2.2 GHz sem saltos de modo, um valor relativamente pequeno e que gostaríamos que fosse maior para outras aplicações, mas que no entanto é suficiente para realizar a espectroscopia de hidrogênio e antihidrogênio. Artigos discutem que laser com cavidades menores tem uma maior estabidade [82], para que pudéssemos comparar e de repente obter variações maiores de frequência, um outro design seguindo os moldes do que foi apresentado mas com uma cavidade menor foi projetado e está em fase de finalização.

Bibliografia

[1] T. W. Hansch, *Nobel Lecture: Passion for precision*, Rev. Mod. Phys. **78**, 1297, 2006.

[2] C. L. Cesar, D. Kleppner, *Two-photon Doppler-free spectroscopy of trapped atoms*, Phys. Rev. A **59**, 4564, 1999.

[3] C. L. Cesar,*Zeeman effect on the 1S-2S transition in trapped hydrogen and antihydrogen*, Phys. Rev. A **64**, 023418, 2001.

[4] Peik E., Lipphardt B., Schnatz H., Schneider T., Tamm C., Karshenboim S. G., *Limit on the Present Temporal Variation of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. **93**, 170801 , 2004.

[5] M. Mudrich, S. Kraft, K. Singer, R. Grimm, A. Mosk, M. Weidemuller, *Sympathetic Cooling with Two Atomic Species in an Optical Trap*, Phys. Rev. Lett. **88**, 253001, 2002.

[6] R. Lambo, C. C. Rodegheri, D. M. Silveira, C. L. Cesar, *Spectroscopy of low-energy atoms released from a solid noble-gas matrix: Proposal for a trap-loading technique*, Phys. Rev. A. , **76**, 061401, 2007.

[7] A. L. Midgall, John V. Prodan, William D. Phillips, Thomas H. Bergeman , Harold J. Metcalf, *First Observation of Magnetically Trapped Neutral Atoms*, Phys. Rev. Lett., **54** ,2596, 1985.

[8] R. deCarvalho, N. Brahms, B. Newman, J M. Doyle, D. Kleppner, T. Greytak, *A new path to ultracold hydrogen*, Canadian Journal Physics **83**, 2005.

[9] Th. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz, e T. W. Hänsch, *Phase-Coherent Measurement of the Hydrogen 1S-2S Transition*

Frequency with an Optical Frequency Interval Divider Chain, Phys. Rev. Lett. **79**,14, 1997.

[10] Kapitza P. L. ,*Viscosity of liquid helium at temperatures below lambda point*, Nature **141** (3558), 74, 1938.

[11] D. D. Osheroff, R. C. Richardson, D. M. Lee, *Evidence for a New Phase of Solid He3*, Phys. Rev. Lett. **28**, 14, 1972.

[12] A. Ashkin, *Acceleration and trapping of particles by radiation pressure.* Phys. Rev. Lett. **24**, 156 (1970).

[13] M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman and E.A. Cornell, *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor.* Science **269** (5221), 1995

[14] G. Luders, *Proof of the TCP theorem* , Ann. Phys. ,**2**, 1, 1957.

[15] T. Bergeman, Gidon Erez, Harold J. Metcalf , *Magnetostatic trapping fields for neutral atoms*, Phys. Rev. A., **35**, 1535, 1987.

[16] J. J. Tollett, C. C. Bradley, C. A. Sackett, and R. G. Hulet , *Permanent magnet trap for cold atoms*, Phys. Rev. A., **51**, R22, 1995.

[17] C. E. Wieman, D. E. Prichard, D. J. Wineland, *Atom Cooling, Trapping, and. Quantum Manipulation*, Rev. Mod. Phys., **71**, 253-262, 1999.

[18] K. Sengstock , W. Ertmer, *Laser Manipulation of Atoms*, Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, Academic Press, New York, **35**, 1-44, 1995.

[19] H. Metcalf, P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms*, Phys. Reports **244**, 203, 1994.

[20] H. Metcalf, P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping*, Springer-Verlag, New York, 1999.

[21] E.L. Raab , M. Prentiss, A. Cable , S. Chu and D.E. Pritchard D.E., *Trapping of neutral atoms with radiation pressure*, Phys. Rev. Lett. **59**, 1987.

[22] M. B. Gaarde, R. Zerne, Luo Caiyan, Jiang Zhankui, J. Larsson, and S. Svanberg, *Determination of radiative lifetimes of excited states in neutral gold using time-resolved vacuum-ultraviolet laser spectroscopy*, Phys. Rev. A., **50**, 209, 1994.

[23] E. Narevicius, A. Libson, C. G. Parthey, I. Chavez, J. Narevicius, U. Even, and M. G. Raizen, *Stopping Supersonic Beams with a Series of Pulsed Electromagnetic Coils: An Atomic Coilgun*, Phys. Rev. Lett., **100**, 093003, 2008.

[24] W. D. Phillips , H. Metcalf , *Laser Deceleration of an Atomic Beam*, Phys. Rev. Lett., **48**, 596, 1982.

[25] R. Campargue, *Atom and Molecular Beams: The State of the Art 2000.*, Springer, Berlin, 2001.

[26] H. L. Bethlem, G. Berden, G. Meijer, *Decelerating Neutral Dipolar Molecules*, Phys. Rev. Lett.,**83**, 1558, 1999.

[27] H. L. Bethlem, G. Meijer, *Production and application of translationally cold molecules*, Int. Rev. Phys. Chem., **22**, 73, 2003.

[28] H. L. Bethlem, F. M. H. Crompvoets, R. T. Jongma, S. Y. T. van de Meerakker, and G. Meijer , *Deceleration and trapping of ammonia using time-varying electric fields*, Phys. Rev. A., **65**, 053416, 2002.

[29] S. Y. T. van de Meerakker, P. H. M. Smeets, N. Vanhaecke1, R. T. Jongma, and G. Meijer, *Deceleration and Electrostatic Trapping of OH Radicals*, Phys. Rev. Lett.,**94**, 023004, 2005.

[30] B. C. Sawyer, B. L. Lev, E. R. Hudson, B. K. Stuhl, M. Lara, J. L. Bohn, and J. Ye *Magnetoelectrostatic Trapping of Ground State OH Molecules*, Phys. Rev. Lett. **98**, 253002, 2007.

[31] H. F. Hess, G. P. Kochanski, J. M. Doyle, N. Masuhara, D. Kleppner, and T. J. Greytak, *Magnetic trapping of spin-polarized atomic hydrogen*, Phys. Rev. Lett. **59**, 672, 1987.

[32] H. F. Hess, *Evaporative cooling of magnetically trapped and compressed spin-polarized hydrogen*, Phys. Rev. B **34**, 3476, 1986.

[33] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor*, Science **269**, 198, 1995.

[34] D. G. Fried, T. C. Killian, L. Willmann, D. Landhuis, S. C. Moss, D. Kleppner, and T. J. Greytak, *Bose-Einstein condensation of atomic hydrogen*, Phys. Rev. Lett. **81**, 3811, 1998.

[35] K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, *Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3969, 1995.

[36] B. DeMarco and D. S. Jin *Onset of Fermi degeneracy in a trapped atomic gas*, Science **285**, 1703, 1999.

[37] R. V. Krems and A. Dalgarno, *Quantum-mechanical theory of atom-molecule and molecular collisions in a magnetic field: spin depolarization*, J. Chem. Phys. **120**, 2296, 2004.

[38] N. Masuhara, J. M. Doyle, J. C. Sandberg, D. Kleppner, T. J. Greytak, H. F. Hess, and G. P. Kochanski, *Evaporative cooling of spin-polarized atomic hydrogen*, Phys. Rev. Lett. **61**, 935, 1988.

[39] A. G. Martin, K. Helmerson, V. S. Bagnato, G. P. Lafyatis, and D. E. Pritchard, *RF spectroscopy of trapped neutral atoms*, Phys. Rev. Lett. 61, 2431 (1989).

[40] W. Ketterle, N. J. van Druten, *Evaporative cooling of trapped atoms*, Adv. At. Mol. Opt. Phys. **37**, 181, 1996.

[41] Jinha Kim, *Buffer-gas Loading and Magnetic trapping of Atomic Europium*, Tese de Doutorado, Harvard, 1997.

[42] S. Schiller, Lammerzahl, *Molecular dynamics simulation of sympathetic crystallization of molecular ions*, Phys. Rev. A , **68**, 2003.

[43] C. J. Myatt, E. A. Burt, R. W. Ghrist, E. A. Cornell, and C. E. Wieman, *Production of Two Overlapping Bose-Einstein Condensates by Sympathetic Cooling*, Phys. Rev. Lett., **78**, 586, 1997.

[44] W. Petrich, M. H. Anderson, J. R. Ensher, E. A. Cornell, *Stable, tightly confining magnetic trap for evaporative cooling of neutral atoms*, Phys. Rev. Lett. **74**, 3352, 1995.

[45] M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. vanDruten, D. M. Kurn, D. S. Durfee, W. Ketterle, *Bose-Einstein condensation in a tightly confining dc magnetic trap*, Phys. Rev. Lett. **77**, 416, 1996.

[46] A. J. Moerdijk, H. M. J. M. Boesten, and B. J. Verhaar, *Decay of trapped ultracold alkali atoms by recombination*, Phys. Rev. A 53, 916 (1996).

[47] A. J. Moerdijk and B. J. Vehaar, *Collisional two- and three-body decay rates of dilute quantum gases at ultralow temperature*, Phys. Rev. A 53, R19 (1996).

[48] I. F. Silvera and J. T. M. Walraven, *Spin-polarized atomic hydrogen*, In Progress in low temperature physics, Amsterdam, Holland, D. F. Brewer, 1986.

[49] R. J. Knize, Z. Wu, and W. Happer, *Optical pumping and spin exchange in gas cell*, Adv. At. Mol. Opt. Phys. **24**, 223, 1987.

[50] R. deCarvalho, *Inelastic scattering of magnetically trapped atomic chromium*, Tese de Doutorado , Harvard, 2003.

[51] J. M. Gerton, C. A. Sackett, B. J. Frew, and R. G. Hulet, *Dipolar relaxation collisions in magnetically trapped* ^7Li, Phys. Rev. A **59**, 1514, 1999.

[52] G. Herzberg, *Atomic Spectra and Atomic Structure*, Dover, 1945.

[53] N. F. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford University Press, 1955.

[54] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu , F. Laloe, *Quantum Mechanics*, John Wiley e Sons, Paris, 1977.

[55] R. Eisberg, R. Resnick, *Física Quantica*, quarta edição, Campus, 1988.

[56] E. Arimondo, M.Inguscio, P. Violino, *Experimental Determinations of the hyperfine structure in the alkali atoms*, Rev. Mod. Phys. **49** ,1, 1977.

[57] Robert Michniak, *Enhanced Buffer Gas Loading: Cooling and Trapping of Atoms with Low Effective Magnetic Moments.* Tese de doutorado, Harvard, 2004.

[58] J. von Plato, *Boltzmann's ergodic hypothesis*, Springer Berlin/ Heidelberg, 1991.

[59] A. Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd Edition, Willey, 1989.

[60] W. Demtroder, *Laser Spectroscopy - Basic Concepts and Instrumentation*, 2nd Edition, Springer Verlar, 1998.

[61] M. Young, *Optics and Lasers*, Springer Verlar, 1993.

[62] M. G. A. Bernard, G. Duraffourg, *Laser Conditions in Seminconductors*, Phys. Stat. Solidi 1, 699, 1961.

[63] H. C. Casey, M. B. Panish, *Heterostructure Lasers Part A: Fundamental Principles*, New York: Academic Press, 1978.

[64] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, R. O. Carlson,*Coherent Ligth Emission fron GaAs Junctions* , Phys. Rev. Lett. **9**, 366 ,1962.

[65] H. Kroemer, *A Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers*, Proc. IEEE **51**, 1782, 1963.

[66] I. Zh. Alferov, R. F. Kazarinov, *Semiconductor laser with electric pumping*, Inventor's Certificate No. 181737 [in Russian], 1963.

[67] H. Kressel, H. Nelson, *Close-confinement gallium arsenide PN junction Lasers with reduced optical loss at room temperature*, RCA Review. **30**, 106 ,1969.

[68] I. Hayashi, M. B. Panish e P. W. Foy, *A Technique for the Preparation of Low-Threshold Room-Temperature GaAs Laser Diode Structures*, IEEE J. Quantum Electron. **QE-5**, 211, 1969.

[69] I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy e S. Sumski,*Junction lasers which operate continuously at room temperature*, Appl. Phys. Lett. **17**, 109, 1970.

[70] Y. Suematsu e A. R. Adms, *Handbook of Semiconductors Lasers and Photonics Integrated Circuits*, Londres, Chapman & Hill, 1994.

[71] H. Henry Charles, *Quantum Well Lasers* editado por Peter S. Zory Jr., Academic Press, 1993.

[72] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* , Wiley Publishers - USA, 7th Edition, 1997.

[73] M.G. Littman, *Single-mode operation of grazing-incidence pulsed dye laser*, Opt. Lett. **3**, 138, 1978.

[74] C. E. Wieman, L. Hollberg, *Using diode lasers for atomic physics*, Rev. Sci. Instrum. **62**, 1, 1991.

[75] D. A. Manoel, R. L. Cavasso-Filho, A. Scalabrin, D. Pereira e F. C. Cruz, *Frequency doubled diode laser in alternative extended cavity*, Optics Communic. **201**, 157-163, 2002.

[76] L. Ricci, M. Weidemiiller, T. Esslinger, A. Hemmerich, C. Zimmermann, V. Vuletic, W. Kijnig, T. W. HSnsch, *A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics*, Optics Communications **117**, 541-549, 1995.

[77] K. Petermann, *Laser Diode Modulation and Noise*, Klunker Academic Press, 1988.

[78] K. Harvey e C. Myatt, *External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating*, Optics Letters **16**, 910 1991.

[79] M. W. Pan , B. P. Shi, G. R. Gray, *Semiconductor laser dynamics subject to strong optical feedback*, Optics Letter **22**, 166, 1997.

[80] R. Fox, A. Zibrov, L. Hollberg, *Semiconductor Diode Laser - Methods in Experimental Physics*, Academic Press, 1995.]

[81] E. D. Black, *An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization*, Am. J. Phys. **69**, 1, 79, 2001.

[82] S. D. Saliba, M. Junker, L. D. Turner e R. E. Scholten, *Mode stability of external cavity diode lasers*, Applied Optics, **48**, 35, 2009.

[83] Crícia de Carvalho Rodegheri. *Tese de Mestrado*, UFRJ, 2006.

[84] H. Press Willian, A. Teukolsky Saul, T. Vetterling Willian, P. Flannery Brian, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1982.

[85] Fernando Catalani. *Tese de Mestrado*, UNICAMP, 1997.

[86] Jonathan David Weinstein. *Tese de Doutorado*, Harvard, 2001.

Apêndice A - Código em C++ para o resfriamento a Laser do Li em uma Armadilha Magnética

.

```
//Este programa reproduz o movimento de átomos de Li através de uma armadilha magnética
e interagindo com um laser
//O campo magnético tem valor de 1 T ao longo do eixo z,
//O raio da armadilha é de 0.005m
//Este programa utiliza um sofisticado código para resolver ODE a partir do livro Numerical Recipes

#include <string.h>  //string manipulation
#include <stdio.h>   // file I/O
#include <math.h>    // alternate math functions
#include <time.h>    // time functions
#include <iostream.h>

double magmom;
double mass=(7*1.67E-27);
int nqn ;
//radtrp é o raio da armadilha
const double melec = 9.109e-31, echrg = 1.602e-19,c=2.99792458e8,
pi = double(2)*asin(double(1)),radtrp = 0.005,h= 6.626e-34,hbar = 6.626e-34*0.5/pi,
ALPHA= 200, gama = 3.7e7, lambda= 670.96e-9,timerg= 1.0e-3,csi=(6702.16*h*1.e6),
//unidade de energia em Joule campo em Tesla
gs=2.00232,wtrans=(2*pi*c)/lambda;//wtrans é a frequencia de transição

const int npart = 6 ; // tamanho da matriz xv, dyvdt...

//Parametros geradores dos numeros aleatórios
```

Capítulo 5

Conclusões

Tendo em vista a grande dificuldade que foi observada para encontrar uma região onde seria possível realizar o resfriamento e então ajustar os parâmetros corretamente, a simulação computacional se mostra mais uma vez uma ferramenta muito importante para os físicos experimentais, pois direciona o trabalho e ajusta uma séria de parâmetros e evita como nesse caso que muito tempo de trabalho seja empregado em uma idéia com poucas possibilidades de sucesso, o trabalho computacional serviu para o grupo do laboratório LASER do Instituto de Física da UFRJ, já partir para outras idéias e possibilidades, uma vez que o resfriamento a laser do Lítio em uma armadilha com as características da existente não se mostra viável. Variações do *software* simples de serem implementadas se mostram muito interessantes para o grupo, pois podemos ver previamente o espectro do Li que esperamos medir brevemente, apenas descartando no código implementado os processos de emissão e fazendo um histograma dos eventos de absorção em função da frequência.

Foi apresentado e construído um sistema compacto de geração de radiação laser no infravermelho, estabilizada em freqüência. Essa fonte poderá ser utilizada para estudar a transição 1S-2S do hidrogênio fazendo um duplo dobramento de frequência. Potências em torno de 100 mW para o comprimento de onda de 972 nm foi obtida mas do que o suficiente para o projeto à que esse laser se propôe, uma vez que é previsto a utilização de um amplificador ótico do qual é necessária apenas a potência de 30 mW de entrada.

A largura de linha que medimos foi de $\sigma_L = (6.3 \pm 0.9)MHz$, muito longe do que precisamos para o hidrogênio, logo o passo seguinte é a implementação de uma outra cavidade acoplada ao laser para realizar a estabilização na largura de linha

natural do hidrogênio.

A variação que conseguimos variando somente o *piezoelétrico* foi de 2.2 GHz sem saltos de modo, um valor relativamente pequeno e que gostaríamos que fosse maior para outras aplicações, mas que no entanto é suficiente para realizar a espectroscopia de hidrogênio e antihidrogênio. Artigos discutem que laser com cavidades menores tem uma maior estabidade [82], para que pudéssemos comparar e de repente obter variações maiores de frequência, um outro design seguindo os moldes do que foi apresentado mas com uma cavidade menor foi projetado e está em fase de finalização.

Bibliografia

[1] T. W. Hansch, *Nobel Lecture: Passion for precision*, Rev. Mod. Phys. **78**, 1297, 2006.

[2] C. L. Cesar, D. Kleppner, *Two-photon Doppler-free spectroscopy of trapped atoms*, Phys. Rev. A **59**, 4564, 1999.

[3] C. L. Cesar,*Zeeman effect on the 1S-2S transition in trapped hydrogen and antihydrogen*, Phys. Rev. A **64**, 023418, 2001.

[4] Peik E., Lipphardt B., Schnatz H., Schneider T., Tamm C., Karshenboim S. G., *Limit on the Present Temporal Variation of the Fine Structure Constant*, Phys. Rev. Lett. **93**, 170801 , 2004.

[5] M. Mudrich, S. Kraft, K. Singer, R. Grimm, A. Mosk, M. Weidemuller, *Sympathetic Cooling with Two Atomic Species in an Optical Trap*, Phys. Rev. Lett. **88**, 253001, 2002.

[6] R. Lambo, C. C. Rodegheri, D. M. Silveira, C. L. Cesar, *Spectroscopy of low-energy atoms released from a solid noble-gas matrix: Proposal for a trap-loading technique*, Phys. Rev. A. , **76**, 061401, 2007.

[7] A. L. Midgall, John V. Prodan, William D. Phillips, Thomas H. Bergeman , Harold J. Metcalf, *First Observation of Magnetically Trapped Neutral Atoms*, Phys. Rev. Lett., **54** ,2596, 1985.

[8] R. deCarvalho, N. Brahms, B. Newman, J M. Doyle, D. Kleppner, T. Greytak, *A new path to ultracold hydrogen*, Canadian Journal Physics **83**, 2005.

[9] Th. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz, e T. W. Hänsch, *Phase-Coherent Measurement of the Hydrogen 1S-2S Transition*

Frequency with an Optical Frequency Interval Divider Chain, Phys. Rev. Lett. **79**,14, 1997.

[10] Kapitza P. L. ,*Viscosity of liquid helium at temperatures below lambda point*, Nature **141** (3558), 74, 1938.

[11] D. D. Osheroff, R. C. Richardson, D. M. Lee, *Evidence for a New Phase of Solid He3*, Phys. Rev. Lett. **28**, 14, 1972.

[12] A. Ashkin, *Acceleration and trapping of particles by radiation pressure.* Phys. Rev. Lett. **24**, 156 (1970).

[13] M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman and E.A. Cornell, *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor.* Science **269** (5221), 1995

[14] G. Luders, *Proof of the TCP theorem* , Ann. Phys. ,**2**, 1, 1957.

[15] T. Bergeman, Gidon Erez, Harold J. Metcalf , *Magnetostatic trapping fields for neutral atoms*, Phys. Rev. A., **35**, 1535, 1987.

[16] J. J. Tollett, C. C. Bradley, C. A. Sackett, and R. G. Hulet , *Permanent magnet trap for cold atoms*, Phys. Rev. A., **51**, R22, 1995.

[17] C. E. Wieman, D. E. Prichard, D. J. Wineland, *Atom Cooling, Trapping, and. Quantum Manipulation*, Rev. Mod. Phys., **71**, 253-262, 1999.

[18] K. Sengstock , W. Ertmer, *Laser Manipulation of Atoms*, Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, Academic Press, New York, **35**, 1-44, 1995.

[19] H. Metcalf, P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms*, Phys. Reports **244**, 203, 1994.

[20] H. Metcalf, P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping*, Springer-Verlag, New York, 1999.

[21] E.L. Raab , M. Prentiss, A. Cable , S. Chu and D.E. Pritchard D.E., *Trapping of neutral atoms with radiation pressure*, Phys. Rev. Lett. **59**, 1987.

[22] M. B. Gaarde, R. Zerne, Luo Caiyan, Jiang Zhankui, J. Larsson, and S. Svanberg, *Determination of radiative lifetimes of excited states in neutral gold using time-resolved vacuum-ultraviolet laser spectroscopy*, Phys. Rev. A., **50**, 209, 1994.

[23] E. Narevicius, A. Libson, C. G. Parthey, I. Chavez, J. Narevicius, U. Even, and M. G. Raizen, *Stopping Supersonic Beams with a Series of Pulsed Electromagnetic Coils: An Atomic Coilgun*, Phys. Rev. Lett., **100**, 093003, 2008.

[24] W. D. Phillips , H. Metcalf , *Laser Deceleration of an Atomic Beam*, Phys. Rev. Lett., **48**, 596, 1982.

[25] R. Campargue, *Atom and Molecular Beams: The State of the Art 2000.*, Springer, Berlin, 2001.

[26] H. L. Bethlem, G. Berden, G. Meijer, *Decelerating Neutral Dipolar Molecules*, Phys. Rev. Lett.,**83**, 1558, 1999.

[27] H. L. Bethlem, G. Meijer, *Production and application of translationally cold molecules*, Int. Rev. Phys. Chem., **22**, 73, 2003.

[28] H. L. Bethlem, F. M. H. Crompvoets, R. T. Jongma, S. Y. T. van de Meerakker, and G. Meijer , *Deceleration and trapping of ammonia using time-varying electric fields*, Phys. Rev. A., **65**, 053416, 2002.

[29] S. Y. T. van de Meerakker, P. H. M. Smeets, N. Vanhaecke1, R. T. Jongma, and G. Meijer, *Deceleration and Electrostatic Trapping of OH Radicals*, Phys. Rev. Lett.,**94**, 023004, 2005.

[30] B. C. Sawyer, B. L. Lev, E. R. Hudson, B. K. Stuhl, M. Lara, J. L. Bohn, and J. Ye *Magnetoelectrostatic Trapping of Ground State OH Molecules*, Phys. Rev. Lett. **98**, 253002, 2007.

[31] H. F. Hess, G. P. Kochanski, J. M. Doyle, N. Masuhara, D. Kleppner, and T. J. Greytak, *Magnetic trapping of spin-polarized atomic hydrogen*, Phys. Rev. Lett. **59**, 672, 1987.

[32] H. F. Hess, *Evaporative cooling of magnetically trapped and compressed spin-polarized hydrogen*, Phys. Rev. B **34**, 3476, 1986.

[33] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor*, Science **269**, 198, 1995.

[34] D. G. Fried, T. C. Killian, L. Willmann, D. Landhuis, S. C. Moss, D. Kleppner, and T. J. Greytak, *Bose-Einstein condensation of atomic hydrogen*, Phys. Rev. Lett. **81**, 3811, 1998.

[35] K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, *Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3969, 1995.

[36] B. DeMarco and D. S. Jin *Onset of Fermi degeneracy in a trapped atomic gas*, Science **285**, 1703, 1999.

[37] R. V. Krems and A. Dalgarno, *Quantum-mechanical theory of atom-molecule and molecular collisions in a magnetic field: spin depolarization*, J. Chem. Phys. **120**, 2296, 2004.

[38] N. Masuhara, J. M. Doyle, J. C. Sandberg, D. Kleppner, T. J. Greytak, H. F. Hess, and G. P. Kochanski, *Evaporative cooling of spin-polarized atomic hydrogen*, Phys. Rev. Lett. **61**, 935, 1988.

[39] A. G. Martin, K. Helmerson, V. S. Bagnato, G. P. Lafyatis, and D. E. Pritchard, *RF spectroscopy of trapped neutral atoms*, Phys. Rev. Lett. 61, 2431 (1989).

[40] W. Ketterle, N. J. van Druten, *Evaporative cooling of trapped atoms*, Adv. At. Mol. Opt. Phys. **37**, 181, 1996.

[41] Jinha Kim, *Buffer-gas Loading and Magnetic trapping of Atomic Europium*, Tese de Doutorado, Harvard, 1997.

[42] S. Schiller, Lammerzahl, *Molecular dynamics simulation of sympathetic crystallization of molecular ions*, Phys. Rev. A , **68**, 2003.

[43] C. J. Myatt, E. A. Burt, R. W. Ghrist, E. A. Cornell, and C. E. Wieman, *Production of Two Overlapping Bose-Einstein Condensates by Sympathetic Cooling*, Phys. Rev. Lett., **78**, 586, 1997.

[44] W. Petrich, M. H. Anderson, J. R. Ensher, E. A. Cornell, *Stable, tightly confining magnetic trap for evaporative cooling of neutral atoms*, Phys. Rev. Lett. **74**, 3352, 1995.

[45] M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. vanDruten, D. M. Kurn, D. S. Durfee, W. Ketterle, *Bose-Einstein condensation in a tightly confining dc magnetic trap*, Phys. Rev. Lett. **77**, 416, 1996.

[46] A. J. Moerdijk, H. M. J. M. Boesten, and B. J. Verhaar, *Decay of trapped ultracold alkali atoms by recombination*, Phys. Rev. A 53, 916 (1996).

[47] A. J. Moerdijk and B. J. Vehaar, *Collisional two- and three-body decay rates of dilute quantum gases at ultralow temperature*, Phys. Rev. A 53, R19 (1996).

[48] I. F. Silvera and J. T. M. Walraven, *Spin-polarized atomic hydrogen*, In Progress in low temperature physics, Amsterdam, Holland, D. F. Brewer, 1986.

[49] R. J. Knize, Z. Wu, and W. Happer, *Optical pumping and spin exchange in gas cell*, Adv. At. Mol. Opt. Phys. **24**, 223, 1987.

[50] R. deCarvalho, *Inelastic scattering of magnetically trapped atomic chromium*, Tese de Doutorado , Harvard, 2003.

[51] J. M. Gerton, C. A. Sackett, B. J. Frew, and R. G. Hulet, *Dipolar relaxation collisions in magnetically trapped* ^7Li, Phys. Rev. A **59**, 1514, 1999.

[52] G. Herzberg, *Atomic Spectra and Atomic Structure*, Dover, 1945.

[53] N. F. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford University Press, 1955.

[54] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu , F. Laloe, *Quantum Mechanics*, John Wiley e Sons, Paris, 1977.

[55] R. Eisberg, R. Resnick, *Física Quantica*, quarta edição, Campus, 1988.

[56] E. Arimondo, M.Inguscio, P. Violino, *Experimental Determinations of the hyperfine structure in the alkali atoms*, Rev. Mod. Phys. **49** ,1, 1977.

[57] Robert Michniak, *Enhanced Buffer Gas Loading: Cooling and Trapping of Atoms with Low Effective Magnetic Moments.* Tese de doutorado, Harvard, 2004.

[58] J. von Plato, *Boltzmann's ergodic hypothesis*, Springer Berlin/ Heidelberg, 1991.

[59] A. Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd Edition, Willey, 1989.

[60] W. Demtroder, *Laser Spectroscopy - Basic Concepts and Instrumentation*, 2nd Edition, Springer Verlar, 1998.

[61] M. Young, *Optics and Lasers*, Springer Verlar, 1993.

[62] M. G. A. Bernard, G. Duraffourg, *Laser Conditions in Seminconductors*, Phys. Stat. Solidi 1, 699, 1961.

[63] H. C. Casey, M. B. Panish, *Heterostructure Lasers Part A: Fundamental Principles*, New York: Academic Press, 1978.

[64] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, R. O. Carlson,*Coherent Ligth Emission fron GaAs Junctions* , Phys. Rev. Lett. **9**, 366 ,1962.

[65] H. Kroemer, *A Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers*, Proc. IEEE **51**, 1782, 1963.

[66] I. Zh. Alferov, R. F. Kazarinov, *Semiconductor laser with electric pumping*, Inventor's Certificate No. 181737 [in Russian], 1963.

[67] H. Kressel, H. Nelson, *Close-confinement gallium arsenide PN junction Lasers with reduced optical loss at room temperature*, RCA Review. **30**, 106 ,1969.

[68] I. Hayashi, M. B. Panish e P. W. Foy, *A Technique for the Preparation of Low-Threshold Room-Temperature GaAs Laser Diode Structures*, IEEE J. Quantum Electron. **QE-5**, 211, 1969.

[69] I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy e S. Sumski,*Junction lasers which operate continuously at room temperature*, Appl. Phys. Lett. **17**, 109, 1970.

[70] Y. Suematsu e A. R. Adms, *Handbook of Semiconductors Lasers and Photonics Integrated Circuits*, Londres, Chapman & Hill, 1994.

[71] H. Henry Charles, *Quantum Well Lasers* editado por Peter S. Zory Jr., Academic Press, 1993.

[72] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* , Wiley Publishers - USA, 7th Edition, 1997.

[73] M.G. Littman, *Single-mode operation of grazing-incidence pulsed dye laser*, Opt. Lett. **3**, 138, 1978.

[74] C. E. Wieman, L. Hollberg, *Using diode lasers for atomic physics*, Rev. Sci. Instrum. **62**, 1, 1991.

[75] D. A. Manoel, R. L. Cavasso-Filho, A. Scalabrin, D. Pereira e F. C. Cruz, *Frequency doubled diode laser in alternative extended cavity*, Optics Communic. **201**, 157-163, 2002.

[76] L. Ricci, M. Weidemiiller, T. Esslinger, A. Hemmerich, C. Zimmermann, V. Vuletic, W. Kijnig, T. W. HSnsch, *A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics*, Optics Communications **117**, 541-549, 1995.

[77] K. Petermann, *Laser Diode Modulation and Noise*, Klunker Academic Press, 1988.

[78] K. Harvey e C. Myatt, *External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating*, Optics Letters **16**, 910 1991.

[79] M. W. Pan , B. P. Shi, G. R. Gray, *Semiconductor laser dynamics subject to strong optical feedback*, Optics Letter **22**, 166, 1997.

[80] R. Fox, A. Zibrov, L. Hollberg, *Semiconductor Diode Laser - Methods in Experimental Physics*, Academic Press, 1995.]

[81] E. D. Black, *An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization*, Am. J. Phys. **69**, 1, 79, 2001.

[82] S. D. Saliba, M. Junker, L. D. Turner e R. E. Scholten, *Mode stability of external cavity diode lasers*, Applied Optics, **48**, 35, 2009.

[83] Crícia de Carvalho Rodegheri. *Tese de Mestrado*, UFRJ, 2006.

[84] H. Press Willian, A. Teukolsky Saul, T. Vetterling Willian, P. Flannery Brian, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1982.

[85] Fernando Catalani. *Tese de Mestrado*, UNICAMP, 1997.

[86] Jonathan David Weinstein. *Tese de Doutorado*, Harvard, 2001.