

THE MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE, CULTURE AND SPORTS OF THE
REPUBLIC OF ARMENIA
YEREVAN STATE UNIVERSITY

Aleksanyan Artur Yura

ATOMIC TRANSITIONS AND POPULATION CONTROL BY LASER FREQUENCY
SCANNING SPEED AND MAGNETIC FIELD

ABSTRACT

on the specialization 01.04.21 – “Laser Physics”
submitted for the degree
of candidate in physical-mathematical sciences

Yerevan – 2021

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Ալեքսանյան Արթուր Յուրայի

ԱՏՈՄԱԿԱՆ ԱՆՅՈՒՄՆԵՐԻ ԵՎ ԲՆԱԿԵՑՈՒՄՆԵՐԻ ՂԵԿԱՎԱՐՈՒՄԸ
ԼԱԶԵՐԻ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՆ ԾՐՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՄԲ ԵՎ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ
ԴԱՇՏՈՎ

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Ա.04.21 – «Լազերային Ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկա-մաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Երևան – 2021

The topic of the dissertation was approved at the Institute of Physical Research of NAS RA.

Scientific supervisor: candidate of phys.-math. sciences
E. A. Gazazyan
Official opponents: doctor of phys.-math. sciences, professor
A. ZH. Muradyan
doctor of phys.-math. sciences, professor
D. H. Sargsyan
Leading organization: Russian-Armenian University

The defense will take place on June 19, 2021 at 12:00 in Yerevan State University (0025, Yerevan, Alek Manukyan 1), at the sitting of the professional council of physics 049.
The dissertation can be found in YSU library.
The abstract is delivered on May 7 2021.

Scientific secretary of the professional council:

Candidate of phys.-math. sciences, associate professor



V. P. Kalantaryan

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական
Հետազոտությունների Ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու

Է. Ա. Գազազյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Ա. Ժ. Մուրադյան

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Դ. Հ. Սարգսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Հայ-Ռուսական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2021թ. հունիսի 19-ին ժամը 12.00-ին Երևանի
պետական համալսարանում (0025, ք. Երևան, Ալեք Մանուկյան 1), ԲՈԿ-ի 049
Ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2021թ.-ի մայիսի 7-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ



Վ. Պ. Քալանթարյան

General description of the thesis

The relevance of the subject

This thesis is devoted to physical systems where quantum physics is the necessary theoretical formalism needed to be used: atomic systems. Today, lasers are not only applied to investigate quantum (atomic) systems, but also to manipulate and steer properties and processes in these media. In past decades, the most intense studied processes on alkali atoms are Faraday effect (the rotation of the plane of polarization of light), Hanle effect (reduction in the polarization of light), Dicke effect (narrowing of spectral lines in dense alkali vapor), increase of the resonance interaction time in a buffered vapor cell, magneto-optical processes, atomic beam splitting, etc. Except of these effects and processes, the research of resonance interaction opened a way for the construction of lasers based on alkali vapors, for a development of very precise and wide-range optical magnetometers, and also brought a huge contribution in quantum informatics, for instance the construction of optical quantum memory devices, logical gates, etc. Today, in addition to classical (mm- or cm-size) atomic vapor cells, the study of effects raised in a nanocell is very interesting and important because it allows us to use sub-Doppler resolution in the investigation of the phenomena and processes.

Atomic systems become very complicate objects to study as soon as one wants to enter into the hyperfine structure of the atoms. Moreover, the Schrödinger equation is not enough sufficient to examine with a high degree of precision the interaction of this hyperfine structure with external fields as for instance magnetic and electric fields responsible of the Zeeman, Paschen-Back and Stark effects. The high precision of the measurements in the last decades implies to implement sophisticated mathematical and physical tools as Liouville equation, von Neumann formalism, Dirac equation, etc., within more and more powerful computers in order to perform numerical simulations as precise as the measurements.

The first part of this thesis deals with transfer of populations. This part is at the interface of physics and computer sciences. Briefly summarized, the issue could be shortened as: "How much, how far can we replace material components of a computer by optical devices?". More precisely in this part of the thesis we want to demonstrate that atoms and population transfer between hyperfine levels of these atoms are equivalent to logical devices. In order to have calculable and solvable equations, based on the density matrix theory, the atoms used to modeling a possible implementation of these full atomic logical devices are the ones of the first column of the atomic table due to hydrogen-like electronic structure.

The second part of the thesis relates more directly to real experiments on these alkaline atoms. The fluorescence spectra have been obtained and analyzed in a dynamic transient process. Among many information, data, measures that can be extracted from these experiments, it worth to notice the followings: determination of relaxation rates, how to control population in these atomic systems, measure of the populations of the excited atomic

states. As the most satisfactory result of our experiments would be to have an efficient atomic population control, the main goal of this chapter is to determine as precise as possible the most optimal temporal conditions for that.

The last chapter introduces and develops very interesting application of a magnetic field interacting with these alkali atoms. Indeed, while studying atomic M-system in the first chapter we understood that the Zeeman splitting is an easy way to obtain M-like systems. By varying the intensity of the magnetic field we have seen a variation of the transition probability when lighting these alkali atoms with a polarized laser field. Intriguingly, we observed theoretically complete annihilation of some transitions for very precise values of the magnetic field. Thus we have wanted to know more about the theoretical description of this phenomenon and indeed we have been able in some simplified cases to obtain formulas giving the values of these particular B -fields and furthermore in all the cases, all the values of B -field have been exactly determined by numerical simulation. This allows us to envisage the reciprocal effect annihilation of a transition for a very precise value of the B -field means this value can be used as a standard for the calibration of a magnetometer.

The main objectives of the thesis

- To investigate a mechanism of complete population transfer in five level M-type system without each transition exact resonances and to propose realistic schemes of Toffoli and Fredkin gate implementation on five level atomic system.
- To develop a theoretical model and experimentally record the spectra in a transient regime of ^{87}Rb and ^{85}Rb atomic vapor fluorescence, and from the theoretical simulation to be able to determine fitting parameters, such as the relaxation rate and the diffusion coefficient.
- To solve all types of (π , σ^+ and σ^-) “modified” transfer coefficients which have a cancellation numerically and in some cases analytically for rubidium 87 and 85 isotopes, and to propose realistic experiment to determine hyperfine transition cancellations, where the obtained values can be used to calibrate wide-range magnetometers and improve the involved quantities’ accuracy.

The main statements of the thesis

- Full population transfer in five level M-type atomic system using laser frequency scanning methods or various laser pulse sequences.
- Realization of Toffoli and Fredkin universal reversible atomic gates on alkali metal vapor.
- Rubidium vapor fluorescence spectra in a transient regime caused by laser frequency scanning at various scanning speeds.
- A new method to determine rubidium vapor ground state relaxation rate, the diffusion coefficient and respective collisional cross section of a buffered cylindrical cell.

- Magnetic field values for which dipole allowed transitions intensity between magnetic sublevels becomes zero. These values can serve to decrease the uncertainty of involved physical quantities and as standards to calibrate magnetometers.

Scientific novelty and practical importance

- In this thesis a method to make a complete population transfer is proposed without the exact resonances of the atomic transitions. A possible scheme to implement reversible atomic Toffoli and Fredkin gates is proposed. The considered method and atomic gate implementation can be realized using the electronic terms and magnetic sublevels of an alkali atom and can lead to the experimental development of atomic logical devices and to the mentioned above atomic gates for quantum processors.

- Method of determination of the ground state relaxation rate to the equilibrium isotropic state, the diffusion coefficient in a buffered vapor cell, and the corresponding collisional cross section is proposed based on the consideration of the atomic vapor fluorescence spectra in a non-stationary regime. Also it is possible to determinate appropriate temporal conditions for efficient heralded control of atomic population in a multilevel system. We may expect, that the results can be used for the enhancement of efficiency of photochemical reactions, development of new schemes of sensitive optical magnetometers, development of elements for quantum communication systems, and for other applications.

- For the first time, a systematic analysis of all cancellations of optical transitions between magnetic sublevels of hyperfine levels are considered. For the simplest case, which is D_1 line and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ transitions, analytical formulas for the magnetic field value canceling transitions are obtained, which means that the uncertainty of the magnetic field value depends only on the uncertainties of the physical quantities included in the formulas. The study is done for two laser wavelengths. The first one, ~ 795 nm, is the characteristic wavelength of cheap and widely available semiconductor red laser, which makes extremely easy the reproduction of the experiment by any experimental team. Another laser wavelength is ~ 422 nm (blue laser) and the experimental investigation of the transition cancellations will be completely new, because these transitions are not well studied, even frequency differences of fine and hyperfine structures are not precisely measured. Wide-range magnetic field values can serve as a tool to calibrate magnetometers and improve the accuracy of the involved physical quantities, such as frequency differences, Bohr magneton, Landé factors, etc.

Approbation of the work

The results obtained in the dissertation were reported at the conferences “Laser Physics 2017” (Ashtarak, Armenia, 2017), “7th International Symposium on Optics & its Applications (OPTICS-2019)” (Yerevan-Ashtarak, Armenia, 2019) and at the “Laser

Physics 2019” (Ashtarak, Armenia, 2019). The works were also presented at the annual reports of the Institute for Physical Research of National Academy of Sciences, Armenia, discussed at the Theoretical Physics Laboratory’s seminars of the same institution, and at the Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne at the University of Bourgogne, France and also during joint seminars between these institutions. Due to the Covid-19 pandemic, the planned oral presentations at the EGAS conferences had to be canceled.

Publications

On the topic of the dissertation, 5 articles are published in international peer-reviewed journals and 3 abstracts in the conference Book of Abstracts of the mentioned above conferences.

Because of the Covid-19 pandemic, I was blocked in France between August 2020 and February 2021 while I was carrying out a scientific visit to the CNRS Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), France. I was to participate in international conferences of physics, planned and funded by ICB-Dijon-France and IPR-Ashtarak-Armenia, but the pandemic banned all these conferences.

Workload

The content of the thesis is presented on 113 pages, it contains 33 figures, 19 tables and 146 references.

Thesis summary

The dissertation consists of a list of abbreviations, an introduction, a first chapter “IMPLEMENTATION OF UNIVERSAL LOGICAL ATOMIC GATES”, a second chapter “RUBIDIUM VAPOR FLUORESCENCE IN A TRANSIENT INTERACTION REGIME” and a third one “NEW STANDARD MAGNETIC FIELD VALUES DETERMINED BY TRANSITION CANCELLATIONS BETWEEN MAGNETIC SUBLEVELS OF RUBIDIUM VAPOR”, then a “CONCLUSION AND OUTLOOK” before a relevant bibliography.

The ***Introduction*** formulates the relevance of the work, goals, scientific novelty and practical value of the work, as well as the main provisions for the defense.

In the ***Chapter 1*** two problems are considered. Firstly we studied the way of a complete population transfer based on the technique of linear scanning of the laser field frequency near the resonance of the corresponding transition. This technique can be used to implement atomic logical devices which will ensure high efficiency of these devices. In the second part we demonstrated the implementation of three-bit Toffoli and Fredkin programmable atomic gates on a five-level atom.

As this chapter is a mixture of physics and computer sciences, thus in section 1.1 a review of the literature on coherent superposition states design, adiabatic population transfer

techniques and computer sciences problems, to which the use of the mentioned techniques are relevant, is provided. Also in this section the problem statements are formulated.

Section 1.2 is devoted to the overview of the density matrix theory, Lindblad equation and adiabatic passages with some useful approximations which are needful for the further sections in order to construct the Hamiltonian matrices describing considered atomic systems and interaction of the laser field with them, taking into account the relaxation processes of the atom.

In section 1.3 we considered a five-level M-type alkaline atomic system interacting with four laser pulses of Gaussian shape and of arbitrary duration [see Figure 1].

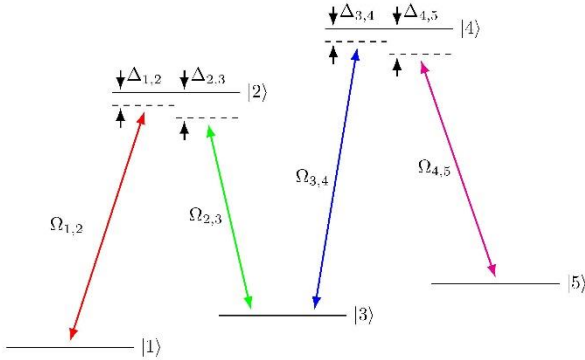


Figure 1: Scheme of atomic levels in the M-system.

The Hamiltonian and the Lindblad operators are written in the matrix form, where the dimension of each matrix is 5×5 . It brings to the system of equations, consisting of 15 first order differential equations, which completely describe our system. This M-system can be a natural one or might be created by the magnetic field due to the Zeeman effect.

In section 1.4 we demonstrated the possibility of complete population transfer between atomic states, using the methods of near resonance scanning of atomic levels combined with laser pulses.

Only for the case of Figure 2 we obtained comparatively bad result of population transfer using asynchronous scanning, because the atom is in two-photon resonances for a short time, but despite this, the scanning technique allows efficient population transfer, and in asynchronous scanning [see Figure 2 (g)] the transition frequencies corresponding to $\Omega_{2,3}$ and $\Omega_{3,4}$, are in single-photon resonances when certain Rabi frequencies are relatively low, which leads to a deterioration in population transfer, compared to the case when synchronous

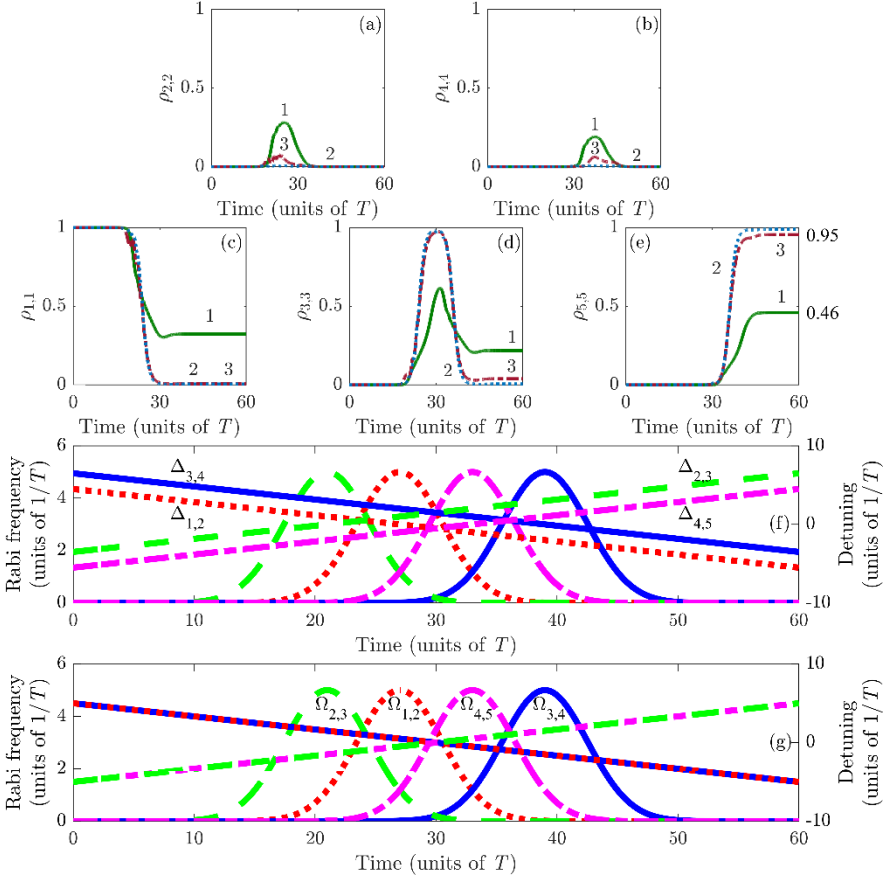


Figure 2: Comparison of the population dynamics of atomic levels (a, b, c, d, e): curves 1 without scanning, curves 2 with synchronous scanning (f), curves 3 with asynchronous scanning (g). Values of the parameters are the following: $\Omega_{1,2} = \Omega_{2,3} = \Omega_{3,4} = \Omega_{4,5} = 5$. The peaks of pulses correspond to the values $t_1 = 27$, $t_2 = 21$, $t_3 = 39$, $t_4 = 33$, $\delta = 5$ and $\Gamma_{i,j} = 0.5$. All parameters are normalized to the total scan time T .

scanning was used. In other cases the techniques of synchronous and asynchronous scanning allow us to make the complete population transfer. Besides the comparison of the two here-fore mentioned scanning techniques, we also compared the obtained results with the results obtained by the method based on the adiabatic population transfer of atomic levels.

In section 1.5 the simple realization of three-bit Toffoli and Fredkin programmable atomic gates on a five-level atom is demonstrated.

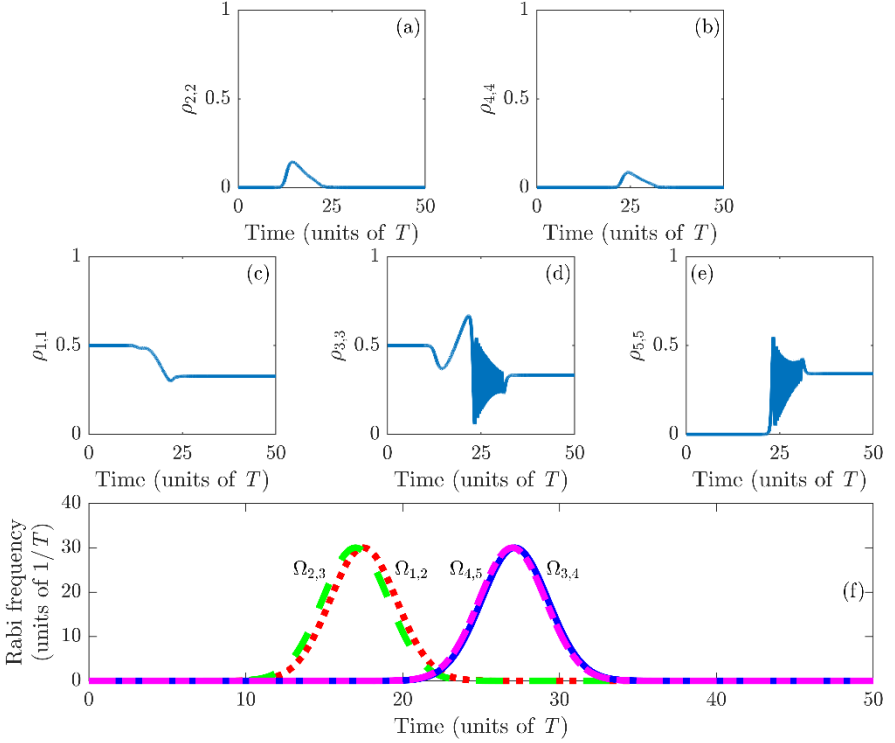


Figure 3: Dynamics of the populations of atomic levels (a, b, c, d, e) and the sequence of switching on of laser pulses (f). This corresponds to input 1 1 0 and the output 1 1 1 of the Toffoli gate. All parameters are normalized to the average pulse duration T .

The scheme is based on an adiabatic transfer of the populations of atomic levels. Figure 3 demonstrates one of the possible operations of the Toffoli gate. In fact the operations are four in sum: two for the Toffoli gate and two for the Fredkin gate. It should be mentioned, that the results were obtained using numerical methods.

The conclusion to the *Chapter 1* can be found in section 1.6.

Chapter 2 is devoted to the study of the fluorescence spectra modification of a room-temperature atomic rubidium vapor in the region ^{87}Rb and ^{85}Rb D_2 line while changing the temporal rate of linear (triangular) scanning of laser radiation frequency. An increase in the ramping speed over a certain value (10^6 MHz/s) results in essential modification of magnitudes of individual atomic transitions, different on rising and falling slopes, which characterize transition from a steady state interaction regime to a transient one.

In section 2.1 can be found a brief review of the relevant to this subject literature, particularly on steady-state interaction, transient interaction and dynamic effects. Also we

discussed about the interaction time of individual atom with the laser field which consist of two components: a time of flight of an atom through a laser beam ($\tau_{\text{TOF}} = 5 \mu\text{s}$) and the interaction time determined by the temporal rate of linear scanning of laser radiation frequency ($\tau_s \approx 6 \mu\text{s}$).

In section 2.2 employing density matrix theory we developed a model, in order to simulate the resonant fluorescence on hyperfine transitions $^{87}\text{Rb } F_g = 1,2 \rightarrow F_e = 0,1,2,3$ and $^{85}\text{Rb } F_g = 2,3 \rightarrow F_e = 1,2,3,4$. The model includes all the relaxation processes which are characteristic to the atomic vapor in a cm-long cell, such as the relaxation rate of the lower energy levels to the equilibrium isotropic state (γ_0) and the total broadening rate comprising radiative damping, collisional broadening, laser radiation linewidth, and inhomogeneous (Doppler) broadening making a dominant contribution (γ_{tot}).

In section 2.3 we analyzed the experimental results and made a good fitting in order to achieve our goals. Experimental measurements were done on a simple setup schematically depicted in Figure 4. Collimated linearly polarized radiation from a free-running single-frequency laser diode (maximum power 25 mW; spectral linewidth 15 MHz) with 2 mm beam diameter was directed into a glass cell (135 mm long, 20 mm diameter, no antirelaxation coating, no added buffer gas) with a side arm containing natural rubidium. Experimental measurements are done for 13 values of triangular scanning frequency and for 3 values of laser power (1 mW, 5 mW and 20 mW), 39 spectra in sum.

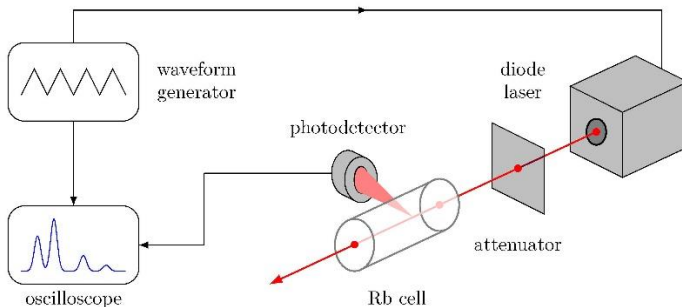


Figure 4: Schematic drawing of the experimental setup.

On Figure 5, black lines correspond to experimental spectra. One can see that for 1 mW laser power, spectra exhibit mirror symmetry, and the shapes of spectra do not change significantly when changing the time of scan. Mirror asymmetry in scans appears for 5 mW with the decrease in scanning time. This asymmetry becomes more pronounced for 20 mW. However, the symmetry tends to recover again when reaching the shortest attainable scan

times. Decrease in the scanning time results in gradual enhancement of fluorescence on these transitions.

To simulate the resonant fluorescence spectra [see Figure 5] two fitting parameters were used: the laser electric field effective amplitude \mathcal{E} and the

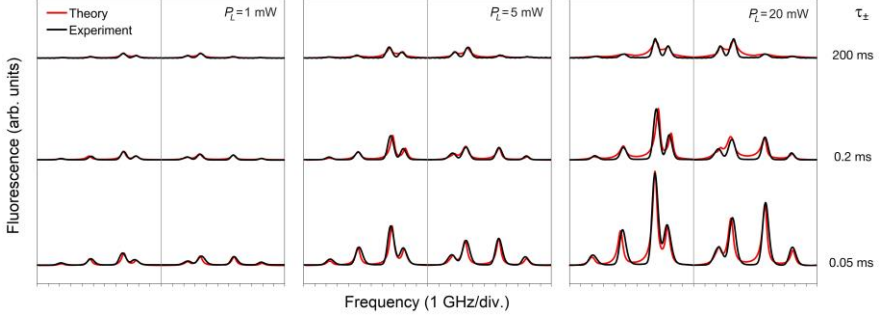


Figure 5: Comparison of theoretical (red lines) and experimental (black lines) fluorescence spectra for 3 values of the laser radiation power and 3 values of the scanning rate.

relaxation rate of the ground energy levels to the equilibrium state γ_0 . It is obvious that \mathcal{E} has different values for different laser powers, but the value of the parameter γ_0 remains unchanged.

From the obtained fitting parameters we move to the discussion part (section 2.4). From the parameter γ_0 , which comprises contributions from population relaxation time T_1 (relevant for our study) and coherence relaxation time T_2 , we calculated the diffusion coefficient and respective total interatomic collision cross section of a buffered cylindrical cell, which are realistic for our case.

The conclusion to the **Chapter 2** can be found in section 2.5.

In the **Chapter 3**, we study the behavior of ^{87}Rb and ^{85}Rb atomic vapor in a cell under the influence of a wide range of magnetic field values (from 0 to 10000 G). We have analyzed the magnetic field dependence of intensities of all the $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2,3/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2,3/2}$ optical transitions between magnetic sublevels of hyperfine levels, excited with π , σ^+ and σ^- polarized light. Magnetic field values canceling $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ transitions are given by analytical expressions. For the $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ transitions, magnetic field values are obtained using numerical methods.

In section 3.1 a review of the literature on optical magnetometers, the Zeeman and Paschen-Back effects, saturated absorption and selective reflection is made. Besides this, we

discuss about similarity and difference between rubidium $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2, 3/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2, 3/2}$ transitions. The main differences are the laser wavelengths and overall transition strengths.

In section 3.2 we analyze the Dirac equation, which is well suitable for the considered problem, and atom-magnetic field interaction. We used this well-known formalism to construct our magnetic Hamiltonian matrices. Our theoretical model taking into account polarization configurations and magnetic field values, allows to determine cancellations of transitions between individual magnetic sublevels of alkali atoms (i.e. drive the transition probability to zero).

In section 3.3 we show an example how the analytical solutions for ^{87}Rb $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ transitions (D_1 line) are calculated [see Figure 6]. There are only two transitions which have a cancellation. In fact, the scheme of ^{87}Rb hyperfine $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ transitions is the same and thus the obtained formulas work as well as for the case of $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ transition cancellations.

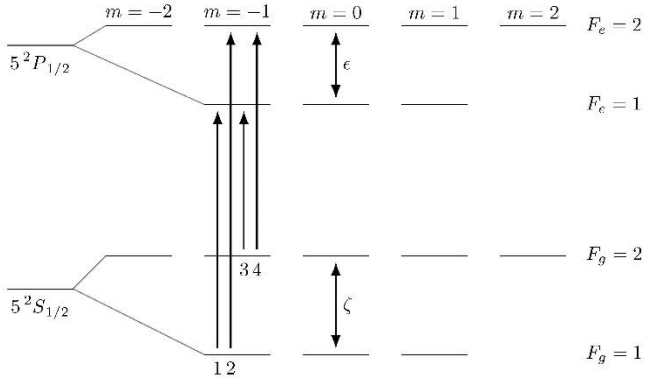


Figure 6: ^{87}Rb D_1 line scheme in magnetic field with π transitions for $m = -1$, where ζ is the frequency difference between the ground states $F_g = 2$ and $F_g = 1$, and ϵ is the frequency difference between the $F_e = 2$ and $F_e = 1$ excited states.

Only transitions 1 ($B_{(-)}^{(-)}$) and 4 ($B_{(+)}^{(+)}$) have a cancellation, they cancel for exactly the same value of magnetic field, and the expression giving the value of magnetic field which brings to the cancellation is

$$B_{(\pm)}^{(\pm)} = \frac{1}{\mu_B} \cdot \frac{3\zeta\epsilon}{3g_I\epsilon - 3g_S\epsilon + 3g_I\zeta - 4g_L\zeta + g_S\zeta}, \quad (1)$$

where μ_B is the Bohr magneton, g_I , g_S and g_L are nuclear, spin and orbital Landé factors respectively.

In section 3.4, using the same reasoning as in section 3.3, we also obtained analytical solutions for ^{85}Rb $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ transition cancellations. Expressions are the following:

$$B_{(\pm)}^{(\pm)} = \frac{1}{\mu_B} \cdot \frac{2\zeta'\varepsilon'}{3g_I\varepsilon' - 3g_S\varepsilon' + 3g_I\zeta' - 4g_L\zeta' + g_S\zeta'} \quad (2)$$

for $m = -1$ and

$$B_{(\pm)}^{(\pm)} = \frac{1}{\mu_B} \cdot \frac{4\zeta'\varepsilon'}{3g_I\varepsilon' - 3g_S\varepsilon' + 3g_I\zeta' - 4g_L\zeta' + g_S\zeta'} \quad (3)$$

for $m = -2$, where ζ' and ε' respectively are the frequency difference between the ground and excited states. Then we compared the values obtained analytically and values obtained using numerical simulation in order to understand how precisely they match. We did it, because the Hamiltonian sub-matrices for more complicated cases (i.e. ^{87}Rb and ^{85}Rb atoms, $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ transitions) are 3×3 and 4×4 dimension, thus to find analytical solutions would be probably be possible using Ferrari and Cardano relations, but leading to unreadable solutions. The difference between analytical values and values obtained by numerical simulation is 10^{-12} , which completely justifies to use numerical simulation for further studies.

In section 3.5 we obtained magnetic field values for ^{87}Rb and ^{85}Rb isotopes $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ transition cancellations. For ^{87}Rb , five π transition cancellations exist, for σ^+ they are 8 and 3 for σ^- . For ^{85}Rb the quantity of transition cancellations are 15 for π transitions, 16 for σ^+ and 11 for σ^- polarized excitation. It should be noted, that some of the transitions have double cancellation.

In section 3.6 we made an experimental feasibility analysis. In the case of a proper experimental implementation, an accurate measurement of the magnetic field corresponding to the canceling of the optical transition will make it possible to determine exact values of the physical parameters, in particular the value of frequency difference between the upper states ε , the only physical constant determined so far with least precision. On the other hand the large range of obtained values for transition cancellations (from 5 G up to 7000 G) for both ^{87}Rb and ^{85}Rb isotopes may become a strong tool in wide-range magnetometer precise calibration.

The conclusion to the **Chapter 3** can be found in section 3.7.

The "CONCLUSION AND OUTLOOK" contains the main results obtained in this thesis and discussion about further researches.

The main results of the thesis have been published/presented in the following Journals/Conferences, Colloquiums, Seminars:

1. A. Yu. Aleksanyan, “Effective Full Population Transfer in M-System Using Scanning Technique”, *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, vol. 56, no. 1, pp. 6-12, Apr 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3103/S1068337221010035>
2. R. Momier, A. Aleksanyan, E. Gazazyan, A. Papoyan and C. Leroy, “New standard magnetic field values determined by cancellations of ^{85}Rb and ^{87}Rb atomic vapors $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2, 3/2}$ transitions”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 257, p. 107371, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107371>
3. A. Aleksanyan, R. Momier, E. Gazazyan, A. Papoyan and C. Leroy, “Transition cancellations of ^{87}Rb and ^{85}Rb atoms in a magnetic field”, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 37, no. 11, pp. 3504-3514, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.403862>.
4. A. Aleksanyan, S. Shmavonyan, E. Gazazyan, A. Khanbekyan, H. Azizbekyan, M. Movsisyan and A. Papoyan, “Fluorescence of rubidium vapor in a transient interaction regime”, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 37, no. 1, pp. 203-210, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.37.000203>
5. A. Aleksanyan, E. Gazazyan, C. Leroy and G. Grigoryan. “Total Transfer of Population in Multi-Level System by Chirped Frequency”. In *7th International Symposium on Optics & its Applications (OPTICS-2019)* (p. 89), Yerevan-Ashtarak, Sep. 2019, Armenia.
6. A. Aleksanyan, S. Shmavonyan, E. Gazazyan, A. Khanbekyan, H. Azizbekyan, M. Movsisyan and A. Papoyan. “Fluorescence of ^{85}Rb and ^{87}Rb vapor in a transient interaction regime”. In *Laser Physics 2019* (p. 24). At: Institute for Physical Research, NAS of RA, Ashtarak, Armenia.
7. A. Yu. Aleksanyan and E. A. Gazazyan, “Realization of the Programmable Logical Atomic Gate”, *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, vol. 53, no. 3, pp. 205-211, July 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3103/S1068337218030040>
8. A. Aleksanyan and E. Gazazyan, “Implementation programmable logical atomic gate”. In *Laser Physics 2017* (p. 34). At: Institute for Physical Research, NAS of RA, Ashtarak, Armenia.

Ամփոփագիր

Ազենախոսության հիմնական դրույթները

- Բնակեցվածության ամբողջական տեղափոխում հնգամկարդակ M-տիպի ատոմական համակարգում օգտագործելով լազերային հաճախության ծրման մեթոդներ կամ տարբեր լազերային իմպուլսների հաջորդականություններ:

- Տոֆոլիի և Ֆրեդկինի ունիվերսալ շրջելի ատոմական փականի իրականացում ավալի մետաղի գոլորշու վրա:

- Ռուբիդիումի գոլորշու ֆլուորեսցենցիայի սպեկտրն անցումային ռեժիմում, պայմանավորված լազերային հաճախության ծրմամբ՝ տարբեր ծրման արագությունների դեպքում:

- Նոր մեթոդ բուֆերային գազով գլանաձև բջջում ռուբիդիումի գոլորշու հիմնական վիճակի ռելաքսացիայի արագության, դիֆուզիայի գործակցի և համապատասխան բախումային լայնական կտրվածքի որոշման համար:

- Մագնիսական դաշտի արժեքներ, որոնց դեպքում մագնիսական ենթամակարդակների միջև դիպոլային թույլատրված անցումների ինտենսիվությունը դառնում է զրո: Դրանք կարող են ծառայել ներգրավված ֆիզիկական մեծությունների անորոշությունը նվազեցնելու համար, և որպես ստանդարտ՝ մագնիսաչափերի տրամաչափման համար:

Այս ատենախոսության հիմնական արդյունքները, որոնք արտահայտում են թեմայի արդիականությունը, գիտական նորամուծությունն ու գործնական կարևորությունը, կարող են ձևակերպվել հետևյալ կերպ:

Ատենախոսության առաջին գլխում տեսականորեն ցուցադրված է ատոմական բնակեցվածության տեղափոխումը M-տիպի համակարգում, որը փոխազդում է չորս Գաուսյան տեսքի իմպուլսների հետ, օգտագործելով խտության մատրիցի հավասարումների ոչ-ստացիոնար թվային լուծումներ: Ցույց է տրված, որ լազերային իմպուլսի հաճախության ծրմամբ՝ ատոմական անցման հաճախության շուրջ, կարող է ամբողջապես և արդյունավետ տեղափոխել բնակեցվածությունը հիմնական մակարդակից դեպի նախապես ընտրված մակարդակ: Այնուհետև ցույց է տրված քվազիռեզոնանսային Գաուսյան տեսքի իմպուլսային լազերների միջոցով Տոֆոլիի և Ֆրեդկինի շրջելի փականների պարզ իրականացումը: Ի հաշիվ նրա, որ այս փականներն ունիվերսալ են, ստացված արդյունքները կարող են հիմք ծառայել ավալի

մետաղի գոլորշիների վրա հիմնված տրամաբանական շղթաների կառուցման համար: Նման համակարգի ընտրությունը պայմանավորված է նրանով, որ այն թույլ է տալիս ստեղծել եռաբիթ փականներ: M-տիպի համակարգ կարելի է ստանալ ալկալի ատոմի էլեկտրոնային մակարդակներից կամ մագնիսական ենթամակարդակներից:

Երկրորդ գլխում ցուցադրված է անցումային ռեժիմում ռուբիդիումի ատոմական գոլորշու D_2 գծի ֆլուորեսցենցիայի սպեկտրի գրանցման պարզ փորձ: Ի հավելումն դրան՝ մշակել ենք տեսական մոդել, որը նկարագրում է բոլոր տեղի ունեցող պրոցեսներն ատոմական գոլորշով բջջում. թվային մոդելավորման արդյունքները շատ լավ համապատասխանում են փորձնական արդյունքներին: Տեսությունը, և դրա համապատասխանեցումը փորձին, թույլ է տալիս որոշել կարևոր պարամետրեր, որոնցից է հիմնական էներգետիկ մակարդակների՝ հավասարակշիռ իզոտրոպ վիճակի ռելաքսացիայի արագությունը: Դրանից բացի կարելի է որոշել ալկալիական ատոմական գոլորշով լցված բուֆերացված բջջի դիֆուզիայի գործակիցը և համապատասխան բախումային լայնական կտրվածքը: Այս և առաջիկա հետազոտությունների հիման վրա մենք հույս ունենք կարողանալ որոշել հատուկ ժամանակային պայմաններ բազմամակարդակ համակարգի ատոմական բնակեցվածության արդյունավետ կառավարման համար, կիրառելով հաճախային մոդուլացված անընդհատ լազեր՝ որպես կառավարելի իմպուլսային ճառագայթման աղբյուր:

Երրորդ գլխում դիտարկել ենք մագնիսական ենթամակարդակների միջև $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2, 3/2}$ և $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2, 3/2}$ օպտիկական անցումների չեղարկումը: Ստացվել են անալիտիկ բանաձևեր՝ նկարագրող $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ և $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ անցումները չեղարկող մագնիսական դաշտի արժեքները: Ավելի բարդ դեպքերի՝ $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ և $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ անցումների համար չեղարկման արժեքները ստացվել են թվային մոդելավորման միջոցով: Անալիտիկ բանաձևերը կարող են օգտագործվել հաշվարկներում ներգրավված ֆիզիկական մեծությունների անճշտությունների փոքրացման համար, որոնցից է, օրինակ, գրգռված մակարդակների միջև էներգիաների տարբերությունը: Մեկ այլ կարևոր կետն այն է, որ ստացված մագնիսական դաշտի արժեքները կարող են ծառայել որպես լավ գործիք լայն տիրույթի մագնիսաչափերի ճշտորիտ տրամաչափման համար (5 Գ-ից մինչև 7000 Գ):

КОНТРОЛЬ АТОМНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ПОПУЛЯЦИЙ СКОРОСТЬЮ СКАНИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРА И МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Артур Юрьевич Алексанян

Обзор

Основные положения выносимые на защиту

- Полный перенос населённости в пятиуровневой системе М-типа с использованием сканирования лазерной частоты или различных последовательностей лазерных импульсов.
- Реализация универсальных обратимых атомных вентилях Тоффоли и Фредкина в парах щелочных металлов.
- Спектры флуоресценции паров рубидия в переходном режиме, обусловленном сканированием лазерной частоты при различных скоростях сканирования.
- Новый метод определения скорости релаксации основных подуровней паров рубидия, коэффициента диффузии и столкновительного сечения с буферным газом в цилиндрической ячейке.
- Величина магнитного поля, при которой интенсивность дипольно разрешенных переходов между магнитными подуровнями обращается в нуль. Эти значения могут служить для уменьшения неопределенности задействованных физических величин и эталоном для калибровки магнитометров.

Основные результаты диссертации, отражающие актуальность темы, научную новизну и практическую ценность, можно сформулировать следующим образом.

В первой главе диссертации теоретически показан эффективный перенос атомных населённости в системе М-типа, которая взаимодействует с четырьмя лазерными импульсами гауссовской формы, используя нестационарные численные решения уравнений для матрицы плотности. Продемонстрировано, что сканированием частоты лазерного импульса в области частоты атомного перехода можно эффективно перенести всю атомную населенность с основного уровня на заранее выбранный. Продемонстрирована простая реализация обратимых атомных вентилях Тоффоли и Фредкина с использованием квазирезонансных лазерных импульсов гауссовской формы. В силу того, что эти вентили являются универсальными, полученные результаты могут служить основой для построения логических схем на основе паров щелочных металлов. Выбор системы М-типа обусловлен тем, что она позволяет реализовывать трёхбитные логические вентили. С другой стороны, система М-типа

может быть реализована на электронных термах или магнитных подуровнях щелочного атома.

Во второй главе мы продемонстрировали простой эксперимент по регистрации спектра флуоресценции D_2 линии атомов рубидия в переходном режиме. Разработанная теоретическую модель, учитывающая все диссипативные процессы в ячейке с атомарными парами рубидия, и результаты численного моделирования очень хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Теория и её согласование с экспериментом позволяют определить важные параметры, например, скорость релаксации основных энергетических уровней к равновесному изотропному состоянию. Кроме того, мы можем определить коэффициент диффузии буферного газа и соответствующее столкновительное поперечное сечение. Основываясь на этом и предстоящих исследованиях, мы надеемся, что сможем определить подходящие временные условия для эффективного контроля атомных населённостей в многоуровневой системе, реализовав частотно-модулированный непрерывный лазер в качестве эффективного источника управляемого импульсного излучения.

В третьей главе рассмотрено схлопывание (отмена) оптических переходов между магнитными подуровнями линий $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2, 3/2}$ и $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2, 3/2}$. Получены аналитические формулы, выражающие величины магнитного поля, при которой интенсивность перехода обращается в нуль для переходов $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ и $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$. Для более сложных случаев, то есть для переходов $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ и $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$, мы получили эти значения путём численного моделирования. Аналитические формулы можно использовать для уменьшения неопределенностей участвующих в расчетах физических величин, таких как разность энергий между возбуждёнными состояниями, магнетона Бора, факторов Ланде. Важным моментом является то, что полученные значения магнитного поля могут служить хорошим инструментом для точной калибровки магнитометров широкого диапазона (от 5 Г до 7000 Г).

