



EIROPAS SAVIENĪBA

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



EIROPAS REĢIONĀLĀS
ATTĪSTĪBAS FONDS

Projekts (vienošanās Nr. 2010/0242/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/036)

„Jauna tehnoloģija magnētiskā lauka un tā gradienta mērīšanai izmantojot nanostrukturētu atomārās gāzes vidi”

Metodes apraksts pilnveidotam un aprobētam teorētiskajam modelim
magnetooptisko signālu analīzei

Aktivitāte 1.3.

„Teorētiskā modeļa pilnveidošana un adaptācija eksperimentāliem apstākļiem”

Aktivitātes periods: 01.01.2011.-31.12.2012.

Apstiprinu:

Vjačeslavs Kaščejevs
(Projekta padomes priekšsēdētājs)

Apstiprinu:

Ruvins Ferbers
(Zinātniskais vadītājs)

Rīga, 2013.g. maijs

Saturs

1. Teorētiskā modeļa apraksts.....	3
2. Teorētiskā modeļa adaptācija eksperimentālajiem apstākļiem.....	4
2. 1. Līmeņu krustošanās signāli ar $\Delta m = 2$	5
2. 2. Līmeņu krustošanās signāli ar $\Delta m=1$	6
Literatūra	8

1. Teorētiskā modeļa apraksts.

Teorētiskais modelis tiek pielāgots sārnu metālos novērojamo magnetooptisko efektu modelēšanai sārnu metālu rezonanses (D_1 un D_2) ierosmei, ņemot vērā attiecīgo spektrālo līniju supersīkstruktūras sašķelšanos

Magnetooptisko signālu teorētiskā modeļa pamatā ir optiskie Bloha vienādojumi, kas apraksta atoma blīvuma matricas ρ izmaiņas laikā:

$$i\hbar \frac{\partial \rho}{\partial t} = [\hat{H}, \rho] + i\hbar \hat{R}\rho, \quad (1)$$

kur $\hat{H}$ ir atoma pilnais Hamiltona operators, kurš apraksta gan atoma iekšējo enerģijas struktūru, kas atkarīga no tā iekšējās simetrijas un koordinātām, gan atoma mijiedarbību ar elektromagnētisko starojumu dipola tuvinājumā, gan arī ārējā magnētiskā lauka ietekmi uz atoma enerģētisko struktūru (Zēmana efektu). Avotā [1] ir aprakstīts, kā no optiskajiem Bloha vienādojumiem var iegūt dinamikas vienādojumus, kuri apraksta blīvuma matricas ierosinātā un pamata stāvokļa Zēmana koherences aprakstošās daļas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{g_i g_j}}{\partial t} = & \left(\Xi_{g_i e_m} + \Xi_{e_k g_j}^* \right) \sum_{e_k, e_m} d_{g_i e_k}^* d_{e_m g_j} \rho_{e_k e_m} - \sum_{e_k, g_m} \left(\Xi_{e_k g_j}^* d_{g_i e_k}^* d_{e_k g_m} \rho_{g_m g_j} + \right. \\ & \left. + \Xi_{g_i e_k} d_{g_m e_k}^* d_{e_k g_j} \rho_{g_i g_m} \right) - i\omega \rho_{g_i g_j} + \sum_{e_k e_l} \Gamma_{g_i g_j}^{e_k e_l} \rho_{e_k e_l} - \gamma_g \rho_{g_i g_j} + \lambda \delta(g_i, g_j) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{e_i e_j}}{\partial t} = & \left(\Xi_{e_i g_m}^* + \Xi_{g_k e_j} \right) \sum_{g_k, g_m} d_{e_i g_k} d_{g_m e_j}^* \rho_{g_k g_m} - \sum_{g_k, e_m} \left(\Xi_{g_k e_j} d_{e_i g_k} d_{g_k e_m}^* \rho_{e_m e_j} + \right. \\ & \left. + \Xi_{e_i g_k}^* d_{e_m g_k} d_{g_k e_j}^* \rho_{e_i e_m} \right) - i\omega \rho_{e_i e_j} - (\Gamma + \gamma_e) \rho_{e_i e_j}. \end{aligned} \quad (2b)$$

kuru atsevišķas daļas apraksta identificējamus un loģiski saprotamus koherentas ierosmes procesus: elektromagnētiskā starojuma inducētās pārejas no pamata uz ierosināto stāvokli un pretējā virzienā, spontāno relaksāciju, caurlidošanas relaksāciju kā arī enerģijas izmaiņas magnētiskajā laukā. Lielumi Ξ_{ij} un to kompleksi saistītās vērtības apraksta elektromagnētiskā starojuma inducēto pāreju amplitūdai un ir atkarīgi no elektriskā dipola pārejas amplitūdas kā arī ierosinošā starojuma frekvences nobīdes attiecībā pret attiecīgās pārejas enerģiju, d_{ij} apraksta atomārās pārejas varbūtību, ņemot vērā atoma un ierosinošā starojuma simetrijas īpašības, ω_{ij} raksturo enerģijas izmaiņas starp līmeņiem i un j magnētiskā lauka darbības rezultātā, Γ raksturo spontānās pārejas un γ – caurlidošanas relaksāciju.

Vienādojumus (2) tiek risināti bāzē $|\xi, F, m\rangle$, kur F ir supersīkstruktūru raksturojošais atoma pilnā leņķiskā momenta kvantu skaitlis un m – tam atbilstošais magnētiskais kvantu skaitlis,

savukārt ξ apzīmē visus pārējos kvantu skaitļus, kuri nav būtiski aplūkoto procesu kontekstā. Aprakstot ierosmi pie salīdzinoši lielām magnētiskā lauka vērtībām, Zēmana efekts ir nelineārs. Tas nozīmē, ka šajos apstākļos kvantu skaitlis F vairs nevar aprakstīt atoma īpašstāvokļus un izmantots bāzes vektorā. Tāpēc šajos apstākļos bāzi definē kā lineāru kombināciju no visām atļautajām F vērtībām:

$$|\xi, \mathcal{F}, m\rangle = \sum_F c_F |\xi, F, m\rangle \quad (3)$$

kur c_F ir Zēmana efektu aprakstošā Hamiltona operatora īpašvektora komponentes. Izteiksmes (3) sekas ir tādas, ka tiek izmainītas atomāro pāreju varbūtības: daļa no pārejām, kas nenotiek bez magnētiskā lauka klātbūtnes, kļūst atļautas, ja tiek uzlikts pietiekami spēcīgs lauks, savukārt atļautajām pārejām izmainās pārejas varbūtība.

Diferenciālvienādojumiem (2) tiek meklēts stacionārais atrisinājums, tas nozīmē, ka to kreisās puses tiek pielīdzinātas nullei, iegūstot lineāru vienādojumu sistēmu, kurai tiek skaitliski atrisināta izmantojot C++ valodā rakstītu datorprogrammu. Rezultātā iegūtās blīvuma matricas tiek izmantotas lai aprēķinātu eksperimentāli novērojamo fluorescences signālu:

$$I_{fl}(\vec{e}) = \tilde{I}_0 \sum_{g_i, e_j, e_k} d_{g_i e_j}^{(ob)*} d_{e_k g_i}^{(ob)} \rho_{e_j e_k}, \quad (4)$$

kur ar $\vec{e}$ apzīmēta fluorescences komponente, kurai tiek aprēķināts signāls. Atkarībā no eksperimenta rakstura, ir iespējams modelēt gan pilno fluorescenci, izmantojot divas savstarpēji ortogonālas komponentes, gan arī atsevišķu komponentu starpību vai attiecību. Lai modelī aprakstītu atomu termiskās kustības ietekmi uz novērotajiem rezultātiem, tiek veikta skaitliska fluorescences intensitātes integrēšana Gausa sadalījumā:

$$I_{Dopp} = \int_{\bar{\omega} - n\sigma_\omega}^{\bar{\omega} + n\sigma_\omega} I(\omega) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\omega} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega})^2}{2\sigma_\omega^2}} d\omega, \quad (5)$$

kur σ_ω ir atbilstošā Doplera frekvenču sadalījuma standartnovirze.

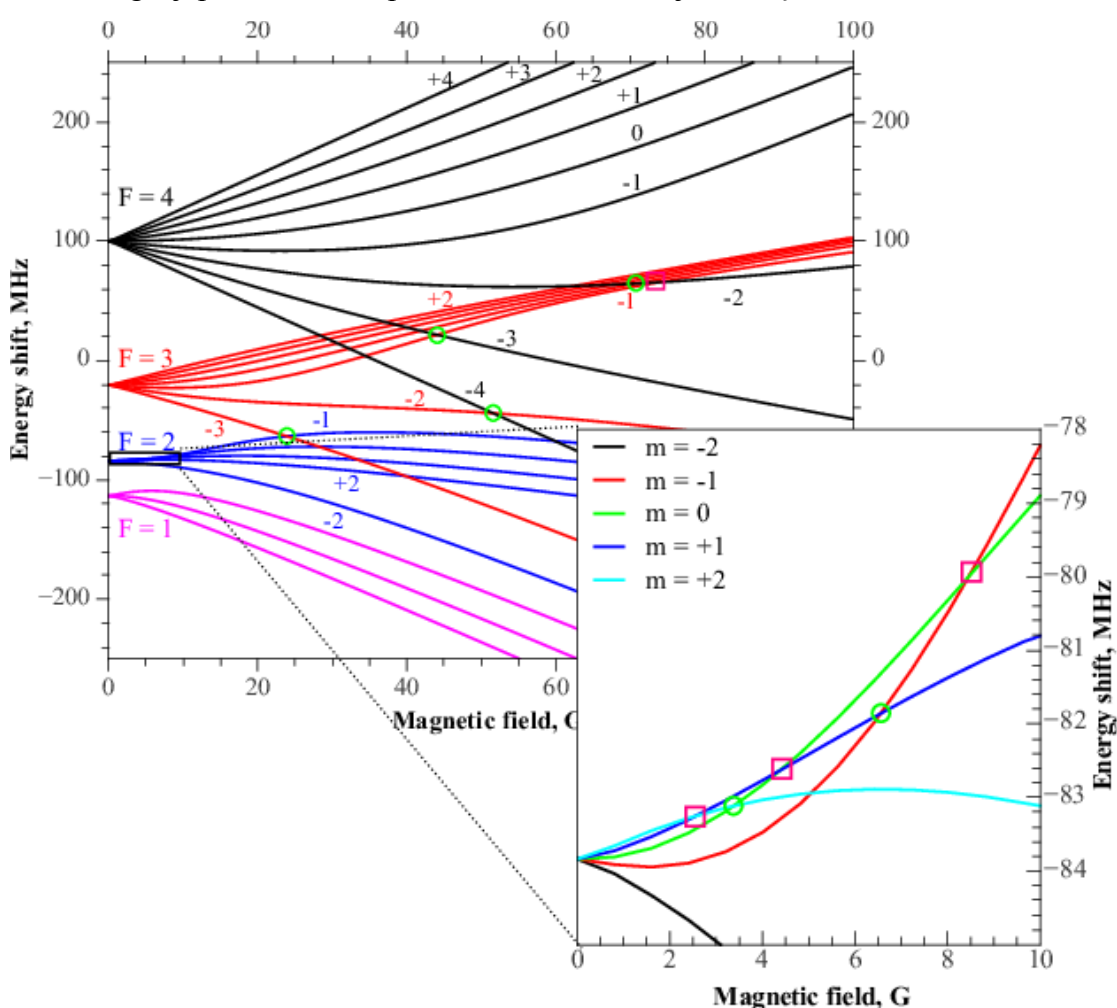
2. Teorētiskā modeļa adaptācija eksperimentālajiem apstākļiem

Pārskata periodā teorētiskais modelis tika adaptēts divu dažādu eksperimentālo rezultātu aprakstam. Abos gadījumos tika analizēti līmeņu krustošanās signāli atomāra rubīdija ierosmē ārēja magnētiskā lauka klātbūtnē. Pirmkārt tika analizēti krustošanās signāli, kas ir novērojami kā fluorescences lineāri polarizēto komponentu atšķirības un veidojas, ja krustojas magnētiskie apakšlīmeņi, kuru magnētiskais kvantu skaitlis atšķiras par 2 vienībām

($\Delta m = 2$). Otrkārt tika eksperimentāli pētīti $\Delta m = 1$ līmeņu krustošanās signāli, kas novērojami cirkulāri polarizētās fluorescences komponentēs.

2. 1. Līmeņu krustošanās signāli ar $\Delta m = 2$

1. attēlā ir redzama ^{85}Rb izotopa $5P_{3/2}$ (D_2 līnijas ierosinātā stāvokļa) supersīkstruktūras līmeņu šķelšanās ārējā magnētiskā lauka ietekmē, redzams, ka ir vairākas vietas, pie kurām krustojas magnētiskie apakšlīmeņi, kuru magnētiskie kvantu skaitļi atšķiras par 2 vienībām (atzīmētas ar aplīšiem). Ierosinot šādu atomāro sistēmu ar lineāri polarizētu gaismu t. s. Hanlē ģeometrijā, pie krustpunktiem atbilstošām magnētiskā lauka vērtībām arī fluorescences starojums būs lineāri polarizēts, savukārt pie citām lauka vērtībām tā polarizācija būs nenozīmīga, jāpiebilst, ka arī pie nulles lauka krustojas līmeņi ar $\Delta m = 2$.

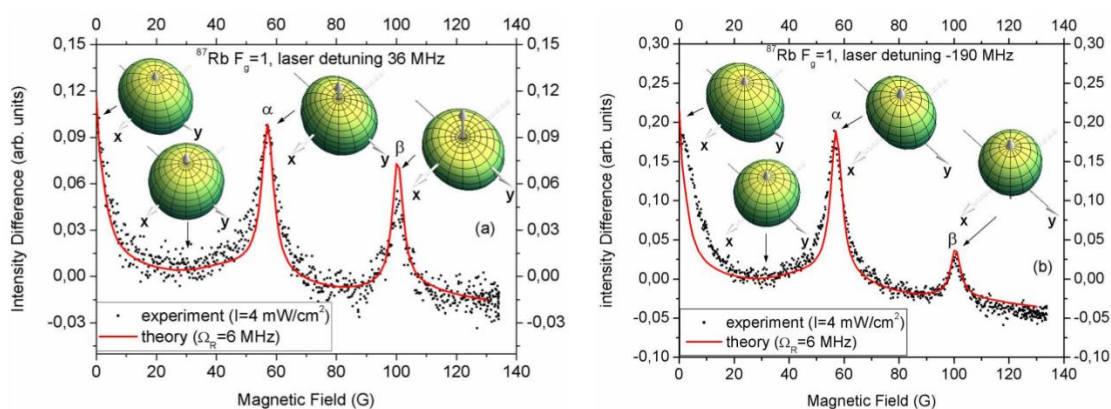


Attēls 1. ^{85}Rb stāvokļa $5P_{3/2}$ supersīkstruktūras līmeņu enerģijas atkarībā no ārējā magnētiskā lauka. Ar aplīšiem ir apzīmēti $\Delta m = 2$, bet ar kvadrātiņiem $\Delta m = 1$ krustpunkti.

Pielāgojot teorētisko modeli šāda eksperimenta apstākļiem, tika novērtēts atomu caurlidošanas relaksācijas ātrums, kā vidējā frekvence ar kādu atomi, termiskās kustības rezultātā ielido un izlido no ierosinošā starojuma kūļa. Šis lielums tika novērtēts, izmantojot

termodinamikas pamatlikumus un, teorētiskā modeļa, rezultāti liecina, ka šāds novērtējums adekvāti apraksta eksperimentālos rezultātus. Bez tam tika noteikta saistība starp teorētiskajā modelī izmantoto Rabi frekvenci, kas apraksta dipola pārejas dinamisko vērtību un eksperimentā noteikto ierosinošā starojuma intensitāti. Šo novērtējumu var veikt teorētiski, zinot atomārās pārejas dipola momentu, tomēr šāds novērtējums ir spēkā tikai taisnstūra formas ierosinošā starojuma kūļa profilam. Ņemot vērā, ka eksperimentā atbilstošo profilu var tuvināti aprakstīt ar Gausa sadalījumu, tad no šī novērtējuma tiek pieļautas atkāpes, izmantojot Rabi frekvenci kā teorētiskā modeļa piedzīšanas parametru. Jāpiebilst, ka empīriskais iegūtā vērtība no teorētiskā novērtējuma atšķiras 2 reizes.

Teorētiskais modelis ļauj ne tikai modelēt eksperimentāli nosakāmo savstarpēji ortogonālo, lineāri polarizēto fluorescences komponentu starpību, bet arī vizualizēt atoma stāvokli, kas rada šādu fluorescenci. Būtībā ja atoms izstaro kādā noteiktā veidā polarizētu gaismu, tas nozīmē, ka tā leņķiskais moments ir sadalīts nesimetriski un to ir iespējams vizualizēt ar metodēm, kas aprakstītas avotā [2]. Vizualizācijas rezultātā tiek iegūta leņķiskā momenta varbūtību sadalījuma virsma, kas demonstrē, šo varbūtību sadalījumu telpā. Modelētās fluorescences komponentu starpības un dažādām situācijām atbilstošo leņķiskā sadalījuma varbūtību sadalījuma virsmu piemērs ir parādīts 2. attēlā. Iegūtie rezultāti ir publicēti zinātniskā žurnālā [3].

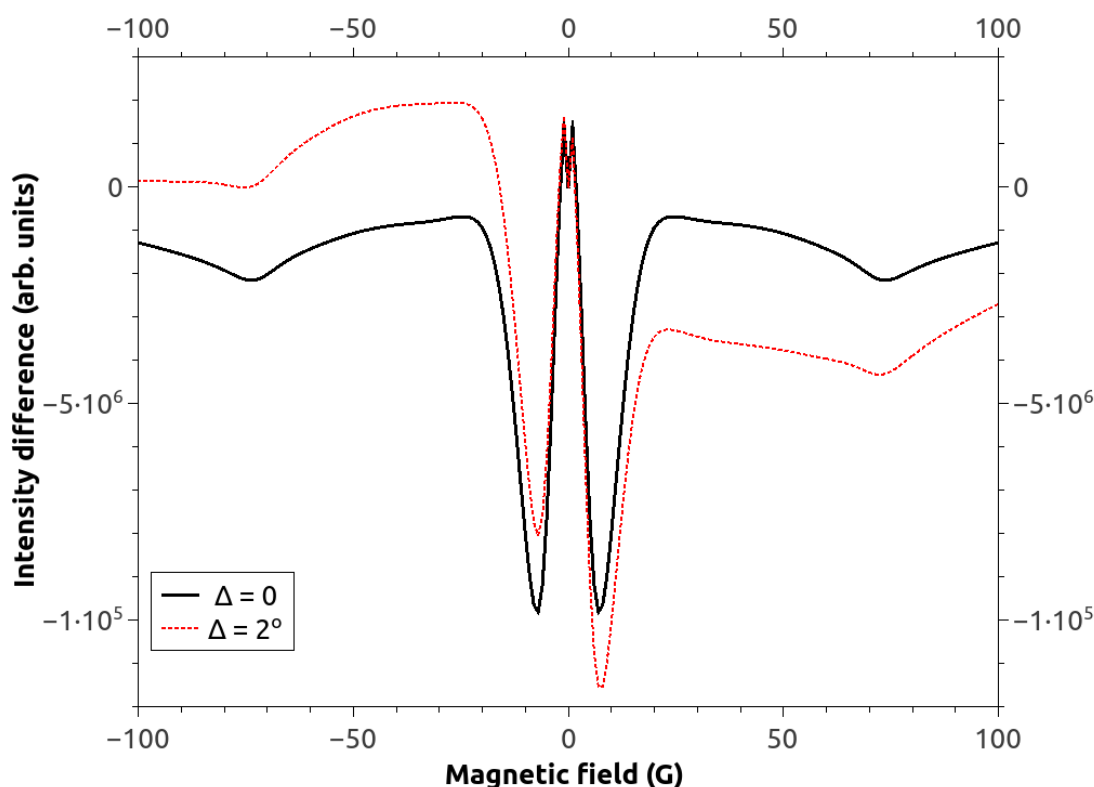


Attēls 2. Līmeņu krustošanās signāli fluorescences lineāri polarizēto komponentu starpībā. Dažādām signāla vērtībām parādīta atbilstošā leņķiskā momenta varbūtību sadalījuma virsmu, kas raksturo fluorescenci izstarojušā atoma polarizāciju.

2. 2. Līmeņu krustošanās signāli ar $\Delta m=1$

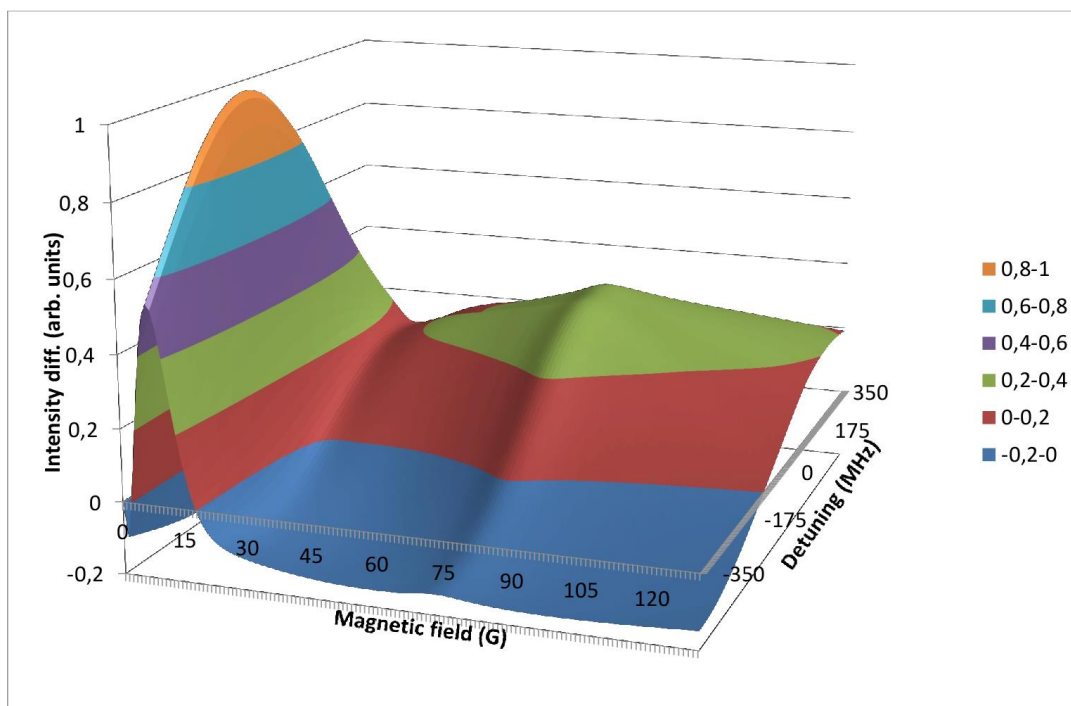
Pēc 1. attēla redzams, ka pie noteiktām magnētiskā lauka vērtībām pastāv krustpunkti tādiem magnētiskajiem apakšlīmeņiem, kuru magnētiskie kvantu skaitļi atšķiras par 1 vienību. Šādi līmeņu krustošanās signāli ir saistīti ar gaismas cirkularitāti, veicot novērojumus virzienā, kas ir ortogonāls izvēlētajai kvantēšanās asij (magnētiskā lauka indukcijas vektora virzienam). Lai

šādus signālus ierosinātu un novērotu, ierosinošā starojuma polarizācija var būt vai nu lineāra, tā, lai polarizācijas vektors nebūtu paralēls vai antiparalēls kvantēšanās asij un nebūtu arī ortogonāls tai. Optimālā ierosmes/novērošanas ģeometrijā polarizācijas vektors veido 45° leņķi ar kvantēšanās asi. Šajā gadījumā novērotais signāls būs simetrisks attiecībā pret magnētiskā lauka nulles punkti, līdz ar to ir iespējams samazināt eksperimentālā signāla troksni. Tomēr jau nelielas novirzes (skatīt 3. attēlu) no šīs ģeometrijas būtiski ietekmē iegūstamo signālu. Šādā veidā, veicot teorētisko modelēšanu un salīdzinot rezultātus ar eksperimentā reģistrētajiem, ir iespējams novērst eksperimentālās ģeometrijas novirzes no optimālās.



Attēls 3. Modelētais $D_m = 1$ līmeņu krustošanās signāls ideālai eksperimenta ģeometrijai (melna nepārtraukta līnija) un neprecīzi (par 2°) novietotam detektoram (sarkana punktēta līnija)

Ņemot vērā, ka cirkularitātes signāli ir salīdzinoši vāji, teorētisko modeli var izmantot, lai meklētu optimālo ierosmes frekvenci, pie kuras signāls iegūst maksimālo vērtību. Teorētiskajā modelēšanā var savākt lielu datu apjomu un to attēlot trīsdimensionālā grafikā, kas uzskatāmi parāda optimālos eksperimenta apstākļus (4. attēls).



Attēls 4. Līmeņu krustošanās signāla modelēšana $\Delta m=1$ ģeometrijā, ^{85}Rb $F_g = 2$ ierosmē, noskaidrojot optimālos apstākļus (ierosinošā starojuma frekvences izskaņošanu), lai novērotu visspēcīgāko signālu.

Šādā veidā teorētisko modeli, kas ir iepriekš pārbaudīts un optimizēts vienkāršākai eksperimenta ģeometrijai ($\Delta m = 2$ rezonansēm) ir iespējams izmantot, plānojot un uzstādot eksperimentālo iekārtu sarežģītākai ģeometrijai.

Literatūra

1. K. Blushs and M. Auzinsh, Physical Review A, **69**, 63806 (2004).
2. S. M. Rochester and D. Budker, American Journal of Physics **69**, 450 (2001).
3. M. Auzinsh, A. Berzins, R. Ferber, F. Gahbauer, L. Kalvans, A. Mozers, and A. Spiss, Physical Review A **87**, 033412 (2013).