

Ридберговские состояния щелочных атомов
как базис для измерения напряженности
микроволнового поля

Глухов И.Л.¹, Овсянников В.Д.^{1,2}, Пальчиков В.Г.^{2,3}

¹Воронежский государственный университет

²ФГУП «ВНИИФТРИ», ³НИЯУ «МИФИ»

Физика ультрахолодных атомов

Новосибирск, декабрь 2022

Detection of far-infrared radiation using Rydberg atoms

2

T.W. Ducas, W.P. Spencer, A.G. Vaidyanathan, W.H. Hamilton, and D. Kleppner
Appl. Phys. Lett., Vol. 35, No 5, p 382 (1 September 1979)

соответствующие энергии переходов $1/n^3$

долгие времена жизни (n^3 спонтанные, n^2 теплоиндуцированные)

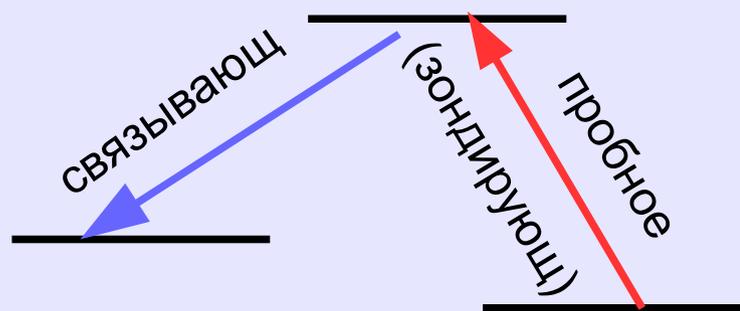
большие матричные элементы n^2

Observation of electromagnetically induced transparency

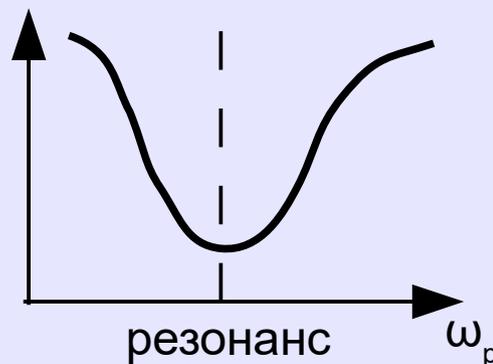
K.-J. Boller, A. Imamoglu, S.E. Harris

Phys. Rev. Lett. Vol. 66, No 20, p 2593 (20 May 1991)

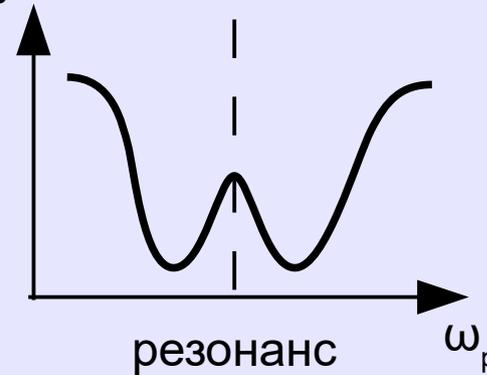
Трехуровневая система



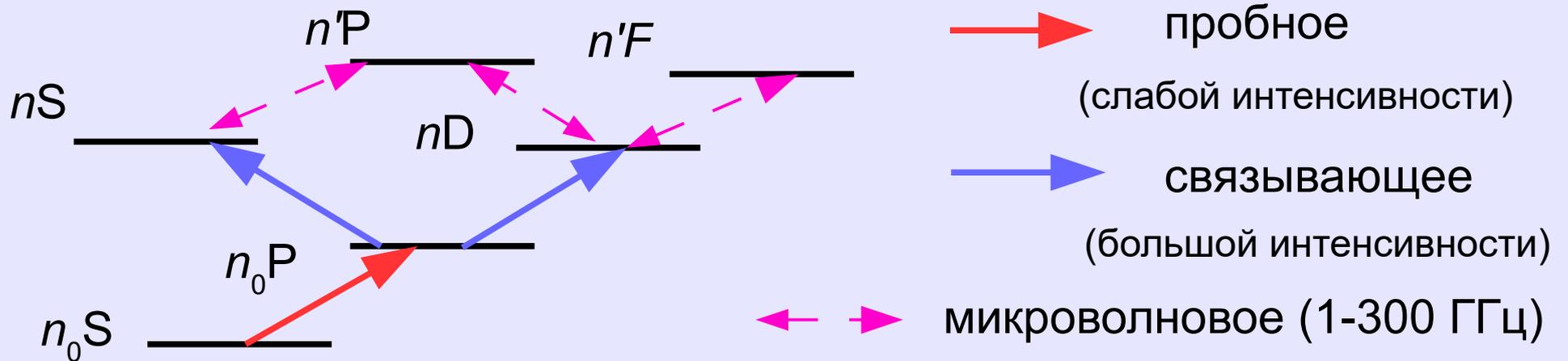
пропускание



пропускание



Четырехуровневая система

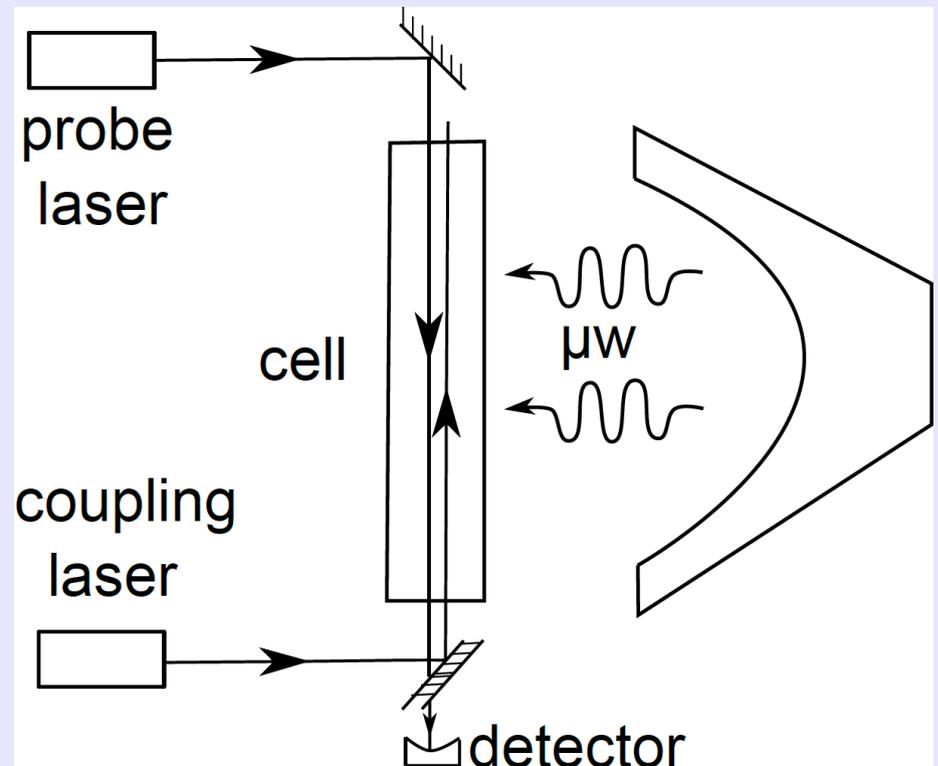


Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances

Nature Physics 8 p 819 (November 2012)
 J.A. Sedlacek, A. Schwettmann, H. Kubler,...

пробный лазер: $\lambda(n_0S_{1/2} \rightarrow n_0P_{3/2})$
 связывающий лазер: $\lambda(n_0P_{3/2} \rightarrow nD_{5/2})$

встречные лазерные пучки
 – компенсация эффекта
 Доплера для расщепления $\Delta\omega_p$



микроволновое поле

$$\omega_{\mu w} = |E_{n'F(P)} - E_{nD}| \pm \varepsilon$$

$$n' = n, n \pm 1, n \pm 2$$

$$\varepsilon \ll |E_{n'F(P)} - E_{nD}|$$



расщепление энергии:

$$E_n^{\pm} = E_{nD} \pm \Delta E(\varepsilon, \Omega)$$

$$\Delta E(\varepsilon, \Omega) = \frac{1}{2} \sqrt{\Omega^2 + \varepsilon^2}$$

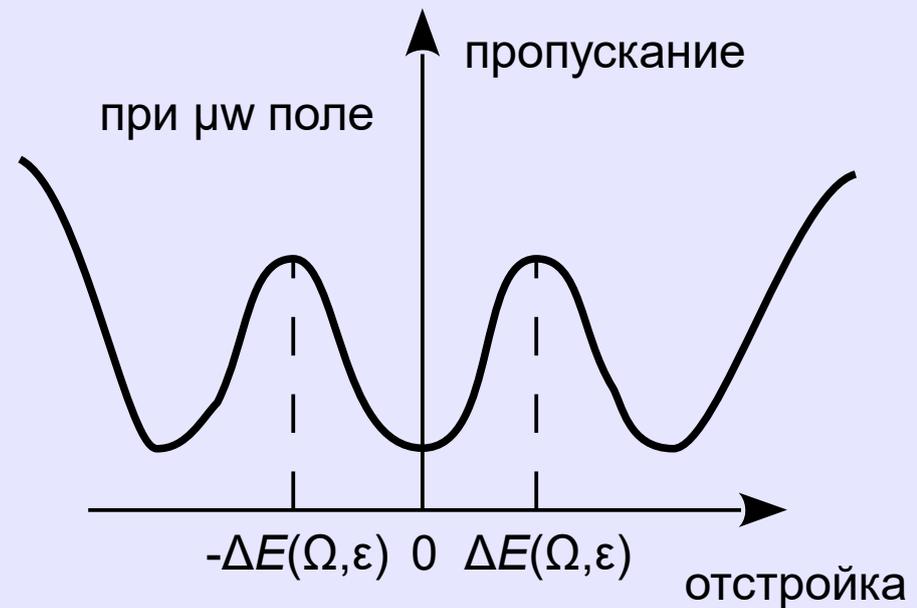
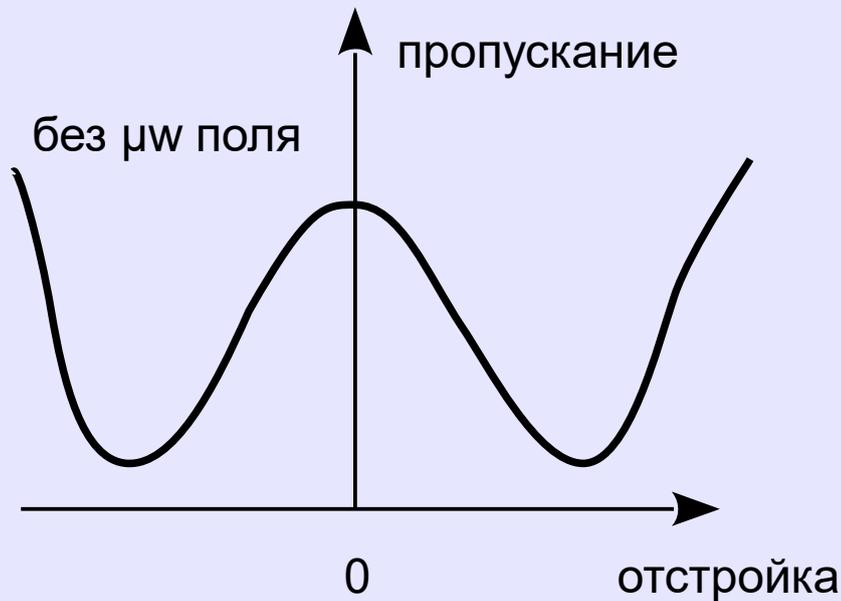
Ω – частота Раби

$$\Omega = FR$$

$$R = \langle n' | z | n \rangle = A \langle n' | r | n \rangle$$

F – амплитуда микроволнового поля

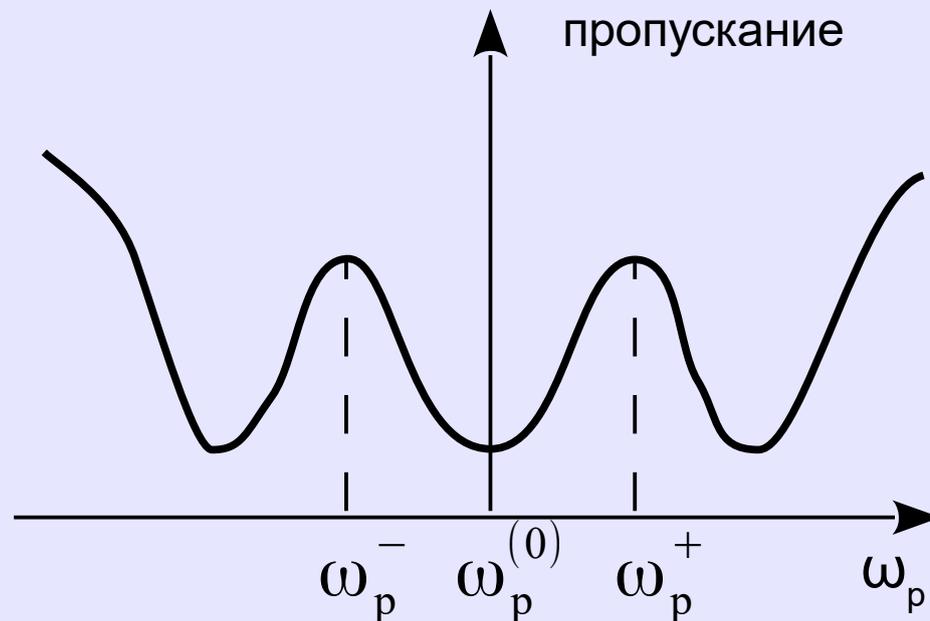
A – угловой множитель



$$\varepsilon=0 \quad \longrightarrow \quad \Delta E(\Omega) = \frac{1}{2} \Omega \quad \longrightarrow \quad \Delta \omega_p = \Omega$$

$$\Delta \omega_p = \omega_p^+ - \omega_p^-$$

$$\Omega = FR \quad \longrightarrow \quad F = \frac{\Delta \omega_p}{R}$$



Измерение напряженности электрического поля СВЧ излучения на частоте радиационного перехода между ридберговскими состояниями атомов Rb-85

Оптика и спектроскопия, том 128 (8) стр 1063 (март 2020)
 Е.Ф. Стельмашенко, О.А. Клезович, В.Н. Барышев,...

Энергии уровней и переходов

$$E_{nL} = E_I - \frac{Ry_A}{(n - \mu_{nL})^2}$$

$$Ry_A = \frac{Ry_\infty}{1 + \frac{m_e}{M_A}}$$

E_I – энергия одноэлектронной ионизации

Аппроксимация квантового дефекта

$$\mu_{nL} = \sum_{q=0}^{q_{\max}} \frac{\mu_{2q}}{(n - \mu_0)^{2q}}$$

Microwave field metrology based on Rydberg states of alkali-metal atoms

Photonics (MDPI), 9, 635 (сентябрь 2022)

q_{\max}

	Li	Na	K	Rb	Cs
S	3	3	3	1	4
P	3	3	3	1	4
D	3	2	3	1	4
F	2	1	1	1	1

Аппроксимация квантового дефекта рубидия

$$E_{nL} = E_I - \frac{Ry_A}{(n - \mu_{nL})^2}$$

$$Ry_A = 109736.605 \text{ cm}^{-1}$$

$$E_I = 33690.81 \text{ cm}^{-1}$$

$$\mu_{nL} = \mu_{0L} + \frac{\mu_{2L}}{(n - \mu_{0L})^2}$$

	S	P	D	F
μ_0	3.131180 7	2.64142	1.346462 2	0.016411
μ_2	0.1787	0.295	-0.594	-0.0784

$$\Delta E_{nLL'} = \frac{d_0}{n^3} \left(1 + \frac{d_1}{n} + \frac{d_2}{n^2} \right)$$

Параметры интерполяции для частот переходов в рубидии

	$nP \rightarrow nS$	$nD \rightarrow (n+1)P$	$(n+2)P \rightarrow nD$	$(n-1)F \rightarrow nD$
d_0 , ГГц	3230,09	1941,67	4639,03	2171.68
d_1	8,17548	4,38292	2,97713	3.53804
d_2	73,3112	21,4566	5,17588	7.22242

Частоты переходов в рубидии

n	ΔE_{nPS} , ГГц	ΔE_{nDP} , ГГц	ΔE_{nPD} , ГГц	ΔE_{nFD} , ГГц
20	642.809	308.911	673.701	324.384
50	30.8125	17.0269	39.39871	18.6529
100	3.51836	2.03100	4.77955	2.25009
150	1.01210	0.592638	1.40212	0.658844
200	0.420760	0.248127	0.588582	0.276310

Матричные элементы (амплитуды) переходов

* отделение угловых частей

$$\langle n' P_{3/2} | z | n S_{1/2} \rangle = \frac{\sqrt{2}}{3} \langle F_{n' P_{3/2}}(r) | r | F_{n S_{1/2}}(r) \rangle$$

$$\langle n' P_{3/2} | z | n D_{5/2} \rangle = \frac{\sqrt{6}}{5} \langle F_{n' P_{3/2}}(r) | r | F_{n D_{5/2}}(r) \rangle$$

$$\langle n' F_{7/2} | z | n D_{5/2} \rangle = \frac{2\sqrt{3}}{7} \langle F_{n' F_{7/2}}(r) | r | F_{n D_{5/2}}(r) \rangle$$

* расчет радиальной части (МКД и МПФ – обобщенные гипергеометрические функции)

Аппроксимация для матричных элементов (амплитуд)

$$R(n) = a_0 + a_1 n + a_2 n^2$$

Коэффициенты интерполяции
для матричных элементов рубидия

	$\langle n P z n S \rangle$	$\langle n D z (n+1) P \rangle$	$\langle (n+2) P z n D \rangle$	$\langle (n-1) F z n D \rangle$
a_0	3,53096	-0,641255	1,23842	-2,15111
a_1	-2,81802	-1,64817	-1,30512	-0,986724
a_2	0,528259	0,663256	0,3866746	0,652534

Благодарим за внимание

Microwave field metrology based on Rydberg states
of alkali-metal atoms

Vitaly D. Ovsiannikov, Vitaly G. Palchikov and Igor L. Glukhov

Photonics (MDPI), Vol. 9, p 635 (September 2022)