

Дипольные эффекты в
ансамблях
ридберговских атомов

Ридберговские состояния: определение

$n \gg 1$ – **ридберговское состояние (РС)** $n \sim 20 - 100$ (эксперимент)

Энергия состояния $E(n, j, l) = -\frac{R'}{(n - \delta(n, j, l))^2} = -\frac{R'}{(n^*)^2}$

R' – константа Ридберга

δ_{lj} – квантовый дефект {для тяжелых атомов щелочных металлов $\delta_{l \gg 3} \approx 0$ }

Ридберговские состояния: свойства

1. Очень малой энергией связи
2. Очень длинным временем жизни
3. Большим дипольным матричным элементом
4. Крайне чувствительны к электрическим полям

Table 1. Properties of Rydberg states.

Property	n -scaling	Value for $80S_{1/2}$ of Rb
Binding energy E_n	n^{-2}	-500 GHz
Level spacing $E_{n+1} - E_n$	n^{-3}	13 GHz
Size of wavefunction $\langle r \rangle$	n^2	500 nm
Lifetime τ	n^3	200 μ s
Polarizability α	n^7	-1.8 GHz/(V/cm) ²
van der Waals coefficient C_6	n^{11}	4 THz \cdot μ m ⁶

Ионизация $3.21 \times \left(\frac{100}{n}\right)^4 \text{ V/cm}$

Возбуждение парных состояний

$$R = R_2 - R_1$$

Если $R \equiv |\mathbf{R}| \gg$ размер электронной волновой функции

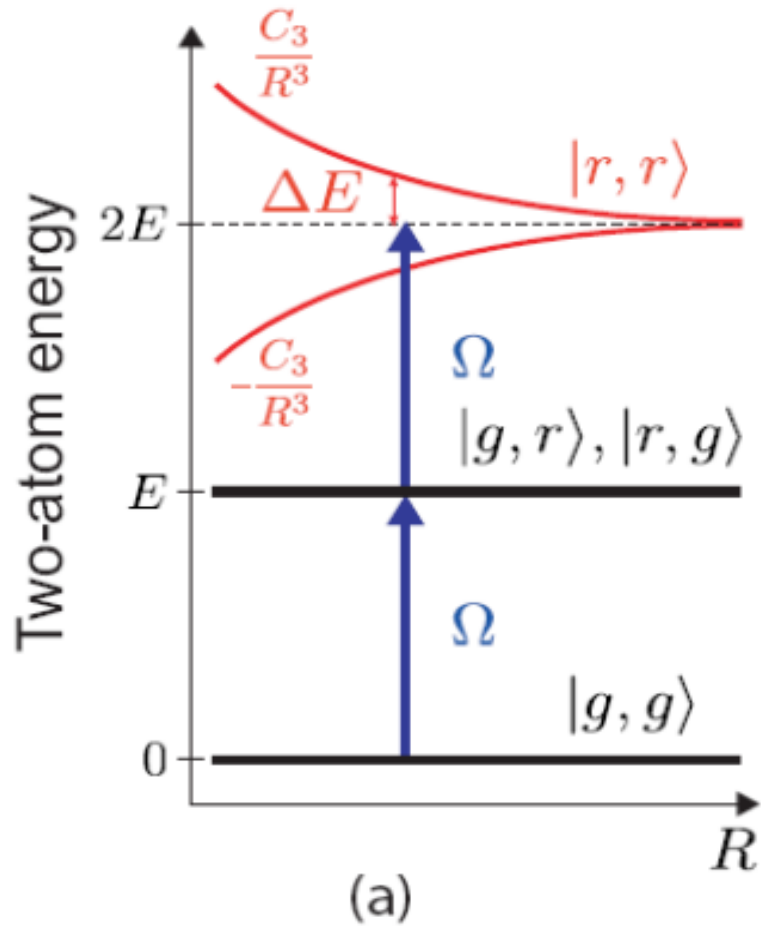
$$V_{ddi} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{d_1 \cdot d_2 - 3(d_1 \cdot n)(d_2 \cdot n)}{R^3}, \quad (3) \quad n = \mathbf{R}/R$$

$|\alpha \rangle, |\beta \rangle, \dots$ - собственные состояния $\rightarrow E_\alpha, E_\beta$

В отсутствие поля собственные состояния – это **парные состояния**

$$|\alpha\beta \rangle = |\alpha \rangle \otimes |\beta \rangle, \quad E_{\alpha\beta} = E_\alpha + E_\beta$$

Дипольная блокада: 2 атома



При лазерном возбуждении ансамбля взаимодействующих атомов в РС узкополосным лазерным излучением может быть возбужден только один РА.

В рез-те коллективные состояния ансамбля выходят из резонанса с лазерным излучением.

Дипольная блокада: ансамбль

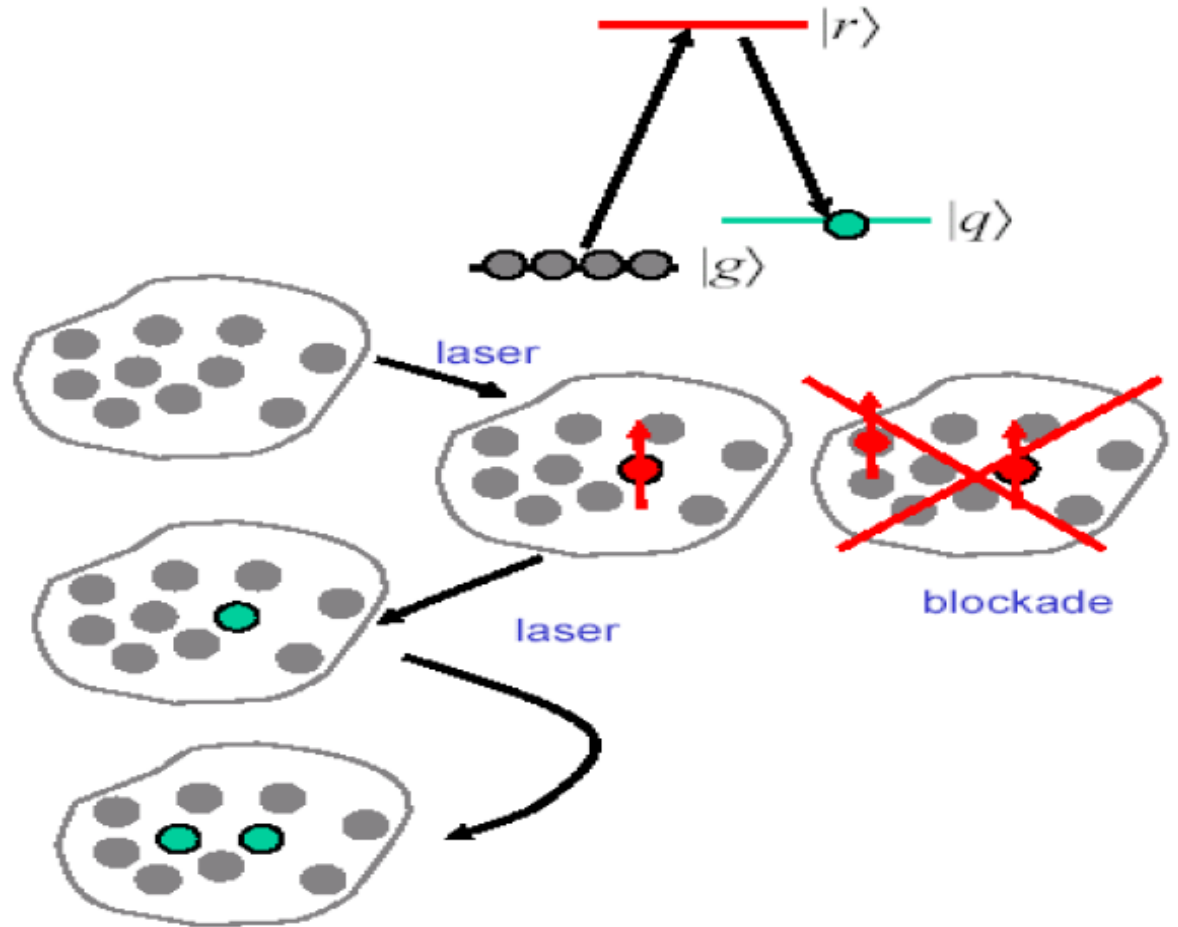
«Сфера блокады» R_b

- атомы в ней неразличимы
- Атомы в основном состоянии не возбуждаются

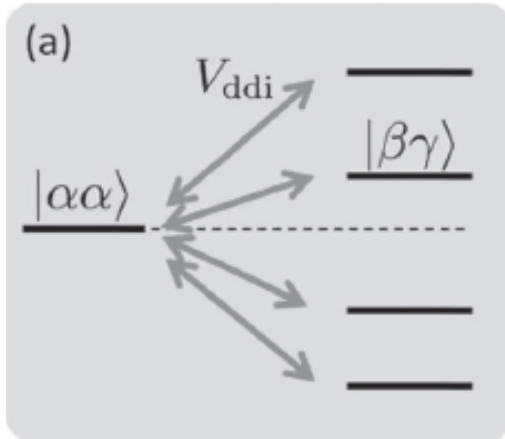
Суператом: размер ансамбля < радиуса блокады

$$|\Psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{N_b}} \sum_i |1(g), \dots, (i-1)(g), i(r), (i+1)(g), \dots, N_b(g)\rangle e^{i\vec{k} \cdot \vec{R}}$$

Частота Раби усиливается в $\sqrt{N_b}$



Режим Ван-дер-Ваальса



Система: 2 атома в одинаковом состоянии $|\alpha\rangle$

$$\Delta E_{\alpha\alpha} = \sum_{\beta,\gamma\dots} \frac{|\langle \alpha\alpha | V_{ddi} | \beta\gamma \rangle|^2}{E_{\alpha\alpha} - E_{\beta\gamma}}$$

$J = L \pm 1/2$ –
полный
угловой
момент

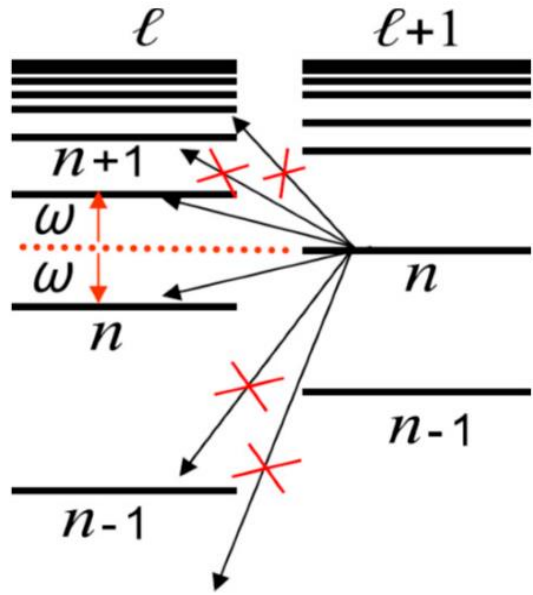
$\Delta E \sim 1/R^6$ - Ван-дер-Ваальс

$$C_6 \sim n^{11}, \quad |\langle \alpha\alpha | V_{ddi} | \beta\gamma \rangle|^2 \sim n^8$$

$L \neq 0$: $2J + 1$ вырожденных Зеемановских подуровней

$|\alpha\alpha\rangle \Rightarrow$ континуум $(2J + 1)^2$ состояний

Резонанс Фёрстера: определение



Двухфотонный резонанс для каскадного перехода
 $\{l, n\} \Rightarrow \{l + 1, n\} \Rightarrow \{L, n + 1\}$

$$|\pm\rangle = (|\alpha\alpha\rangle \pm |\beta\gamma\rangle) / \sqrt{2}$$

$$E_{\pm} = \pm C_3 / R^3$$

$$C_3 = R^3 \langle \beta\gamma | V_{ddi} | \alpha\alpha \rangle$$

Фёрсторовский дефект

$$\Delta = E_{\alpha\alpha} - E_{\beta\gamma}$$

Фикс. $\Delta \neq 0$: переход от ФР к ВдВ режиму.

$$R_c \sim (C_3 / \Delta)^{1/3}$$

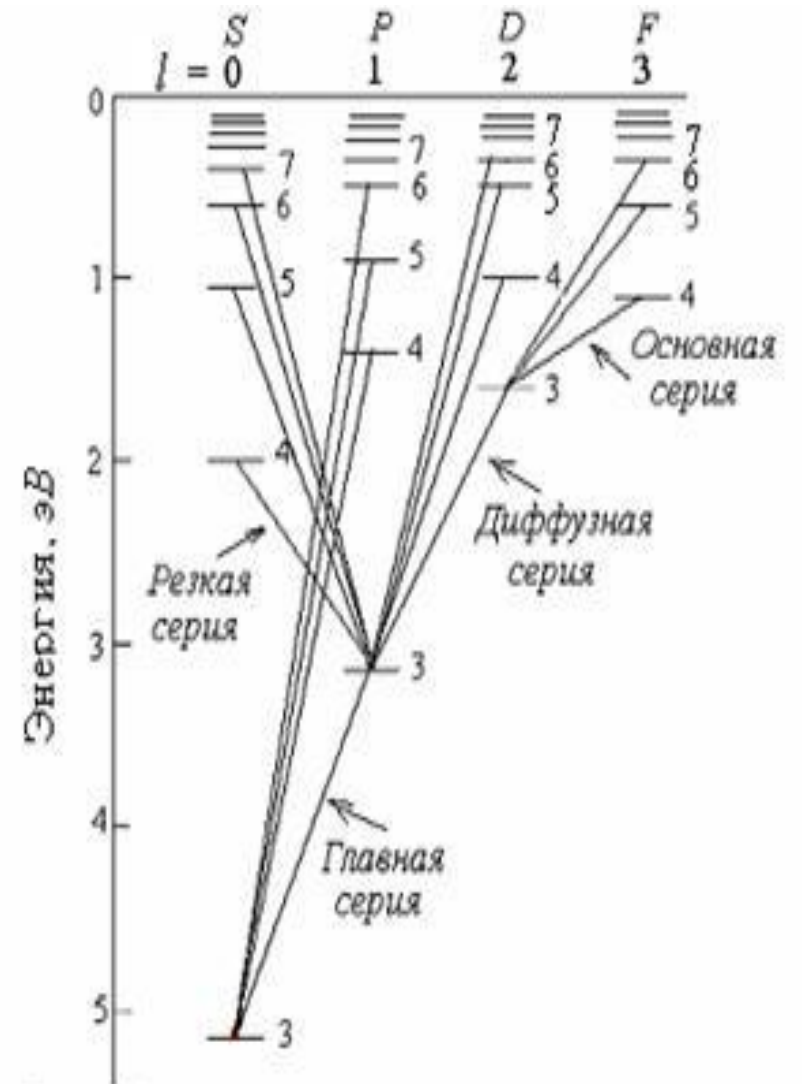
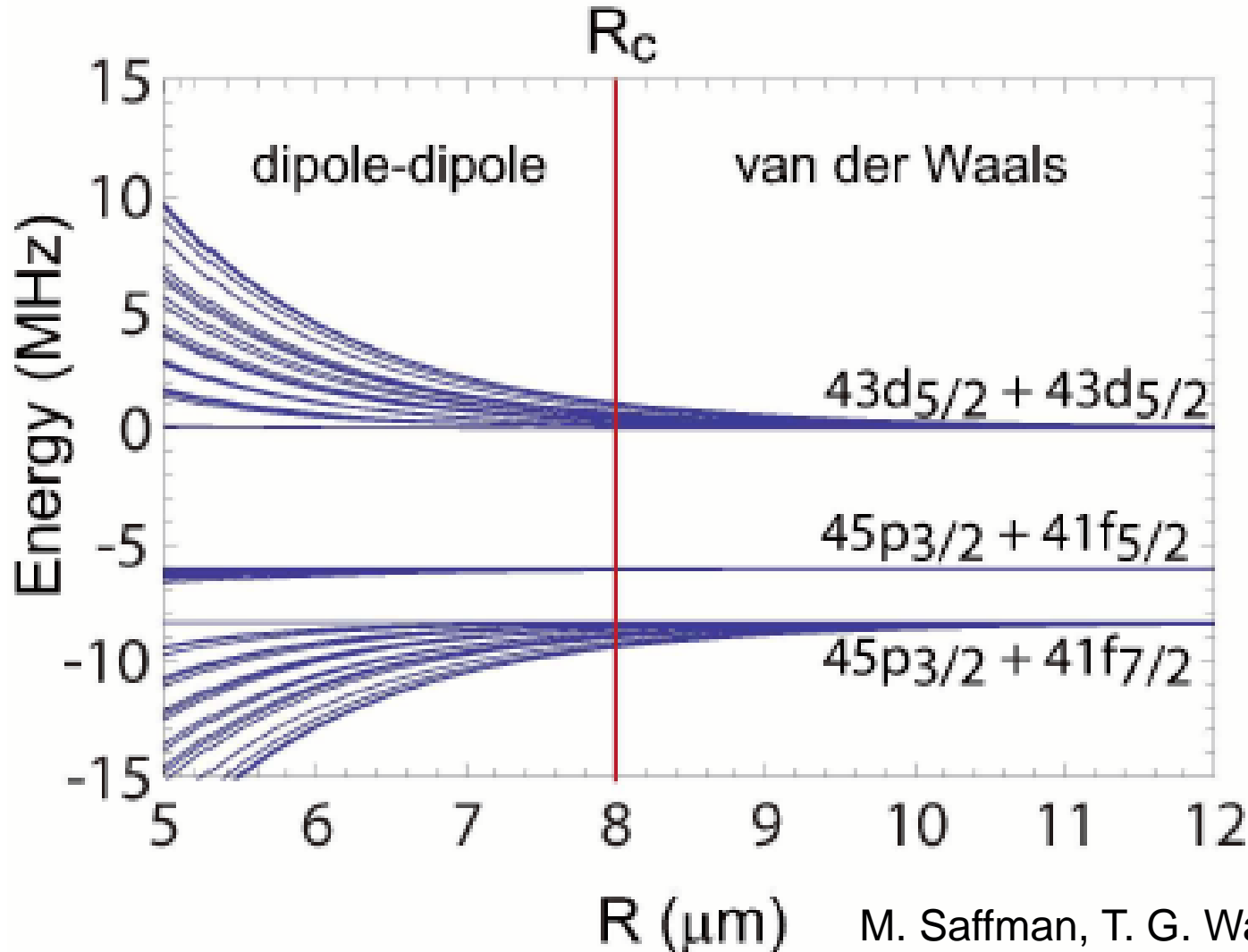


Рис. 2. Схема уровней энергии атома натрия.

Переход от резонансного ДДВ к Ван-дер-Ваальсову



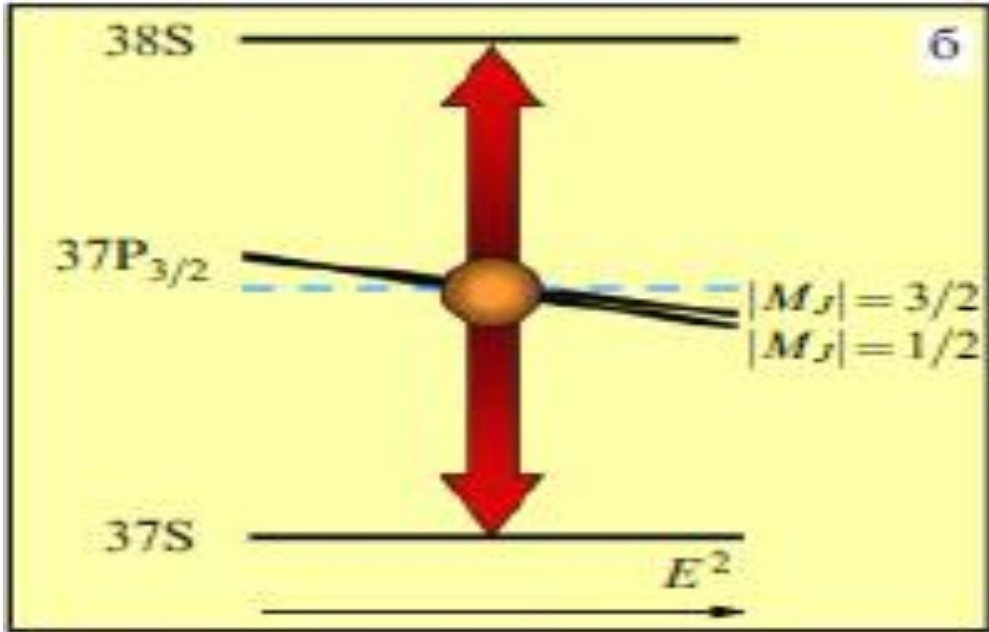
$$\Delta = C_3/R_{vdW}^3$$

$R \ll R_{vdW}$: $\Delta \approx V = C_3/R^3$ -
наибольшая из возможных эн-
я взаимодействия

$$R \gg R_{vdW}: \Delta E \approx \frac{\left(\frac{C_3}{R^3}\right)^2}{\Delta} = \frac{C_6}{R^6}$$

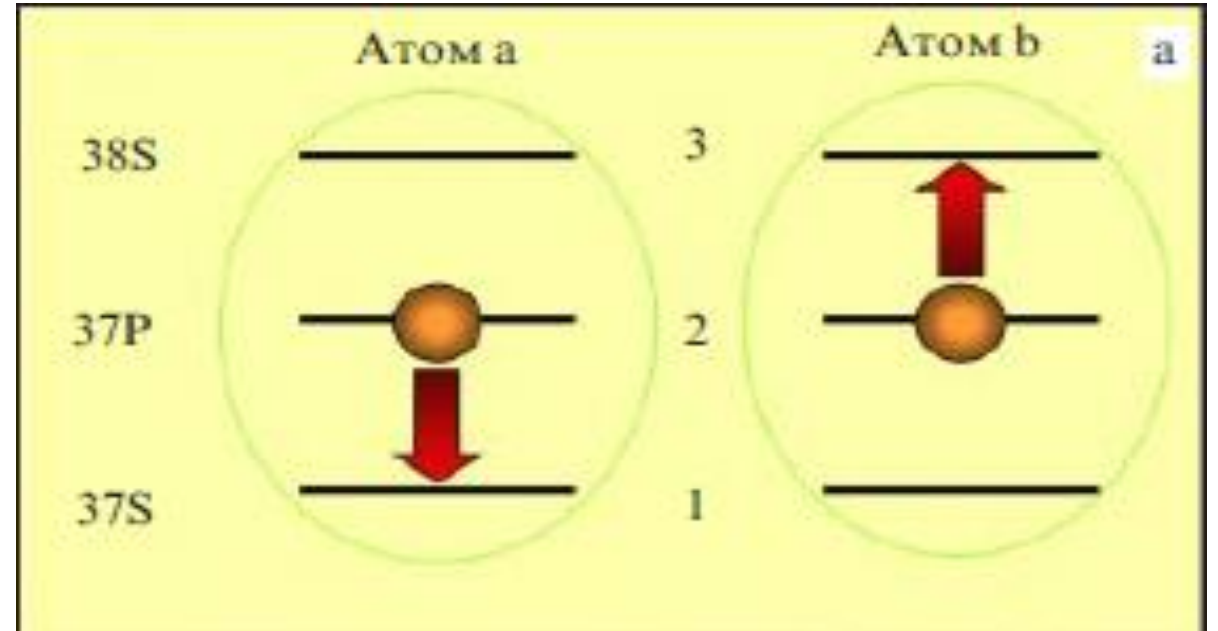
M. Saffman, T. G. Walker, and K. Molmer. Quantum information with rydberg atoms. Sep. 2009.

Резонанс Фёрстера: пример



РФ возникает, когда возбуждаемый РУ 37P по энергии находится точно по середине между соседними.

Система: 2 холодных атома Rb
 $37P_{\frac{3}{2}}(|M_J| = 1/2)$



Резонанс Фёрстера: пример

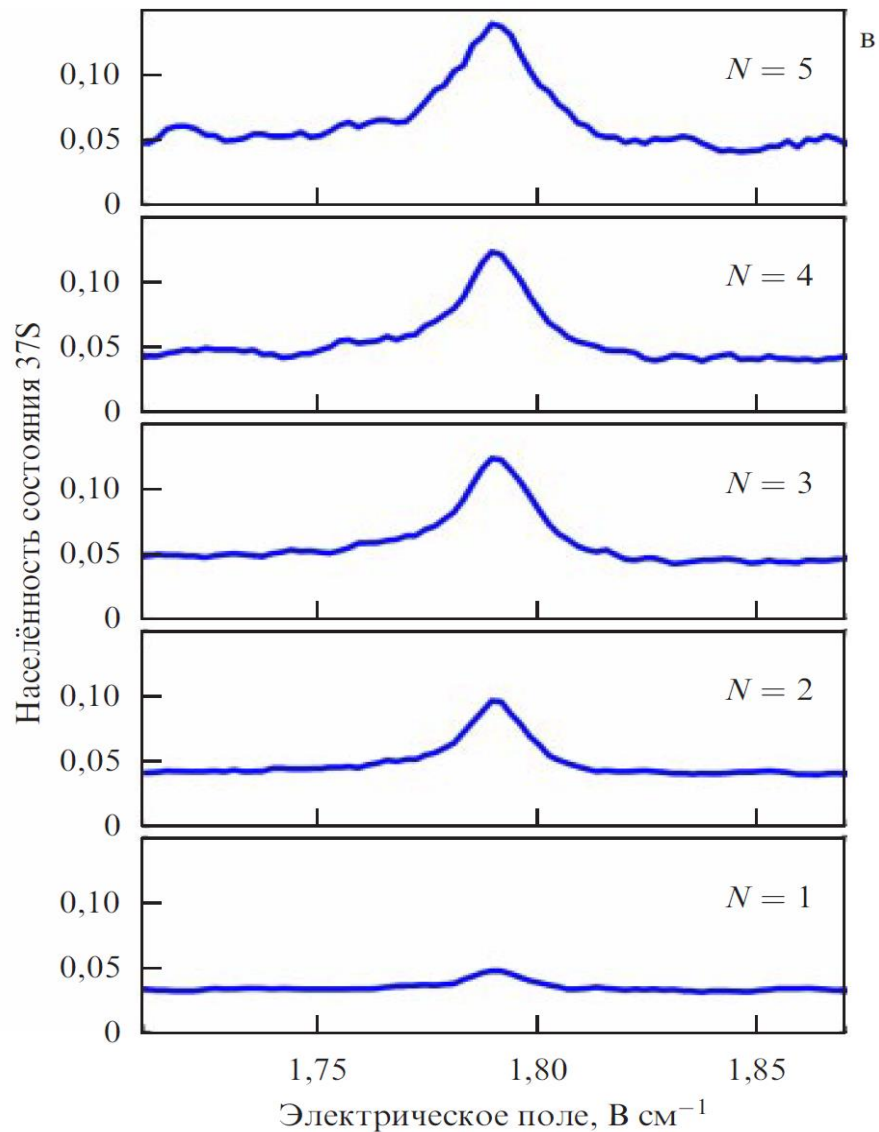


График: Вероятность перехода в конечное состояние 37S для N=1-5 РА. (регистрируются методом селективной полевой ионизации)

Амплитуда и ширина резонанса возрастают в соответствии с теорией, с увеличением числа атомов.

